

# 倒立摆网络控制系统的自适应灰色预测策略研究

吴红英<sup>1</sup> 魏利胜<sup>2</sup>

(义乌工商学院 义乌 322000)<sup>1</sup> (安徽工程科技学院 芜湖 241000)<sup>2</sup>

**摘 要** 基于灰色理论、自适应切换方法以及 MIMO 网络控制系统的研究,提出了一种网络环境下自适应灰色预测控制策略,并对整个建模过程进行了详细推导。该方法利用新陈代谢原理建立等维新息 GM(1,1)模型,其在线辨识参数较少,避免了 Diophantine 方程和逆矩阵的在线求解,从而减少了计算量,提高了网络控制系统的实时性。倒立摆网络控制系统的仿真实验表明了所提方法的有效性。

**关键词** 网络控制系统,自适应灰色预测,灰色模型,倒立摆

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Research on Adaptive Grey Prediction Method for Inverted Pendulum Networked Control Systems

WU Hong-ying<sup>1</sup> WEI Li-sheng<sup>2</sup>

(Yiwu Industrial and Commercial College, Yiwu 322000, China)<sup>1</sup>

(Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000, China)<sup>2</sup>

**Abstract** This paper proposed a new adaptive grey prediction control strategy based on the research of grey theory, adaptive switching method and MIMO networked control systems. The whole modeling procedure of this method was established. The equal dimension GM (1,1) model was established by using metabolic principle. This method only identifies two parameters, and avoids online solving the Diophantine equation and inverse matrix. So the computation load of the algorithm can be reduced greatly, and real-time property is advanced. The efficacy of the proposed method is shown by presenting simulation results from inverted pendulums networked control systems' example.

**Keywords** Networked control systems (NCSs), Adaptive grey prediction, Grey model, Inverted pendulum system

自 20 世纪 90 年代以来,随着计算机、通信、网络、控制等技术的发展,网络控制技术以及在网络平台上构筑而成的网络控制系统已成为自动化领域技术发展的热点<sup>[1,2]</sup>。在网络控制系统中,有许多不确定的因素,如随机的测量噪声、过程噪声、外部未知扰动、随机时延、不确定的数据包丢失率等影响着系统的控制性能。不确定因素不可避免地会降低系统性能,甚至导致系统失稳。目前,国内外很多学者在网络控制系统的控制方法方面已经做了深入的研究。R. Luck 等<sup>[3]</sup>在控制器和执行器的接收端分别设置一个 FIFO 缓冲器和移位寄存器来保存历史时刻的测量值,将网络的随机时变时延重构为确定性时延;Nilsson<sup>[4]</sup>针对随机时滞特性的网络控制系统,提出了基于随机最优控制的方法,用来处理 NCSs 中的随机时变时延,在假设网络时延  $\tau$  小于采样周期  $T$  的情况下,将该时延建模为恒定时延、独立随机时延和 Markov 链,并将时延的影响转化为一个线性二次高斯型问题,然后基于随机控制理论求解 NCSs 的最优控制器;Montestruque 等<sup>[5]</sup>基于对象模型来研究网络控制系统,其目的是通过使用对象模型信息来减少网络通信负载,以提高网络传输的实时性;N. B. Almutairi 等<sup>[6]</sup>针对网络所引起的不确定时延,设计了具有模糊逻辑补偿的网络 PI 控制系统,通过外加模糊调制器来改变

控制器输出增益,使得系统在网络 QoS 发生变化的情况下,无需改变控制器设计参数就能实现自适应调节。

以上控制策略在很大程度上提高了网络控制系统的性能,但是均采用过去信息作为控制器的输入,属于滞后控制策略范畴。为此,蒋静坪等<sup>[7]</sup>对一类长延时网络控制系统采用预测函数控制原理推导出了预测控制律;肖建等<sup>[8]</sup>利用 LS-SVM 对网络控制系统的随机时变时延进行在线估计,将估计结果用于对 NCS 进行自适应预测控制。但上述两种预测控制策略都需要求解 Diophantine 方程,计算量大,从而影响了网络控制的实时性。

本文考虑到灰色预测算法不需要被控对象模型结构的先验信息,且与其他预测控制算法相比较具有计算量小、估计的参数少(仅两个)等优点,并在以上文献的研究基础上,试图将灰色预测思想引入到网络控制系统,探讨一类 MIMO 网络控制系统的自适应灰色预测控制策略,以减小网络不确定性给控制系统性能带来的影响,为 MIMO 网络控制系统的研究开辟一条新途径。

## 1 MIMO 网络控制系统自适应灰色预测控制器设计

所谓的自适应灰色预测控制,是指以传统控制的基本结

到稿日期:2009-10-01 返修日期:2009-12-01 本文受国家自然科学基金(60774059)资助。

吴红英(1969—),女,讲师,主要研究方向为计算机理论和应用、计算机控制等,E-mail: whyzsgzjh@163.com;魏利胜(1978—),男,博士,主要研究方向为网络控制系统、计算机控制以及智能预测控制等。

构为原型,在其反馈回路中加入灰色预测模型,以系统行为数据为采样信息,按新陈代谢原理建立等维新息 GM(1,1)模型,用所建立的等维新息模型预测系统状态的发展,将其作为控制器的输入,以确定网络控制系统的超前控制量,对被控对象进行超前控制。图 1 即为 MIMO 网络控制系统的自适应灰色预测控制框图。

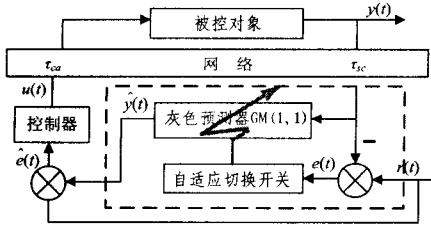


图 1 MIMO 网络控制系统的自适应灰色预测控制框图

图 1 中虚框内即是自适应灰色预测器,它采用滚动策略以保证建立等维新息 GM(1,1)模型;自适应切换开关主要是用于动态调整灰色模型 GM(1,1)的预测步长,当系统输出误差较大( $e > e_l$ )时,可选用负的预测步长  $p_1$  进行后向预测,以达到增加控制量、缩短过度过程响应时间的目的;当系统输出误差较小( $e < e_s$ )时,可选用较大的正预测步长  $p_3$  进行前向预测,以达到减小控制量抑止超调的目的;当系统输出误差处于两者之间( $e_s < e < e_l$ )时,可选用较小的正预测步长  $p_2$ 。即灰色预测器的预测步长可以表示为:

$$p = \begin{cases} p_1 < 0, & e(t) > e_l \\ p_2 > 0, & e_s < e < e_l \\ p_3 > 0, & e(t) < e_s \end{cases} \quad (1)$$

假设网络控制系统采用单包传输且传感器节点和控制器节点采用时间驱动方式,而执行器节点采用事件驱动方式,则具体灰色预测器设计过程如下。

首先,采用式(2)对长度为  $n$  的对象输出序列  $y^{(0)} = \{y(1), y(2), \dots, y(n)\}$  进行级比检测,以判断 GM 建模的可行性。

$$\sigma(k) = \frac{y(k-1)}{y(k)} \quad (2)$$

其中,  $k=2, \dots, n$ , 可得级比序列为:

$$\sigma = [\sigma(2) \ \sigma(3) \ \dots \ \sigma(n)] \quad (3)$$

其可容覆盖为  $(e^{\frac{-2}{n+1}}, e^{\frac{2}{n+1}})$ 。

如果级比  $\sigma(j)$  未落入可容覆盖中,则要对数据进行相应的预变换处理,如对数处理、方根处理或平移处理等。

其次,应用式(4)对  $y^{(0)}$  进行 AGO 生成,得到新的生成序列:

$$y^{(1)} = \{y^{(1)}(1), y^{(1)}(2), \dots, y^{(1)}(n)\}$$

其中,

$$y^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k y(m) \quad (4)$$

根据新序列  $y^{(1)}$ , 计算灰色模型的背景值  $Z^{(1)}$ ,  $Z^{(1)}$  的计算采用式(5), 式中  $\theta(0 < \theta < 1)$  是常数系数。

$$Z^{(1)}(k) = \theta \cdot y^{(1)}(k) + (1-\theta) \cdot y^{(1)}(k-1) \quad (5)$$

通常令  $\theta=0.5$ , 即  $Z^{(1)}$  为  $y^{(1)}$  的 MEAN 序列:

$$Z^{(1)}(k) = 0.5y^{(1)}(k) + 0.5y^{(1)}(k-1) \quad (6)$$

由于 GM 的灰微分方程模型具有如下形式:

$$y^{(0)}(k) + aZ^{(1)}(k) = b \quad (7)$$

其中, 定义  $y^{(0)}(k)$  表示灰导数,  $a$  表示发展系数,  $Z^{(1)}(k)$  表示

白化背景值,  $b$  表示灰作用量, 则式(8)可表达成如下矩阵形式:

$$Y_N = B \cdot P \quad (8)$$

其中,  $Y_N = \{y(2), y(3), \dots, y(n)\}$ ,  $B =$

$$\begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & -Z^{(1)}(3) & \dots & -Z^{(1)}(n) \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T, P = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

在最小二乘准则下可解得:

$$P = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \quad (9)$$

式(9)即 GM(1,1)参数  $a, b$  的矩阵辨识算式。

现推导 GM(1,1)的内涵型表达式, 将式(7)代入式(6)可得:

$$y^{(0)}(k) + 0.5a[y^{(1)}(k) + y^{(1)}(k-1)] = b \quad (10)$$

当  $k > 2$  时, 可推得:

$$(1+0.5a)y^{(0)}(k-1) + ay^{(1)}(k-2) = b \quad (11)$$

即:

$$y^{(0)}(k) = \frac{b - ay^{(1)}(k-1)}{1+0.5a} = \frac{b - ay^{(1)}(k-2)}{1+0.5a} - \frac{ay^{(0)}(k-1)}{1+0.5a} = \left( \frac{1-0.5a}{1+0.5a} \right) y^{(0)}(k-1) \quad (12)$$

当  $k=2$  时,

$$y^{(0)}(2) = \frac{b - ay^{(1)}(1)}{1+0.5a} \quad (13)$$

则根据式(12)和式(13)可得:

$$\hat{y}(t) = y_p^{(0)}(n+p) = \left( \frac{1-0.5a}{1+0.5a} \right)^{n+p-2} \frac{b - ay^{(0)}(1)}{1+0.5a} \quad (14)$$

则可以用式(14)灰色模型对未来被控对象输出值进行预测。其中,  $p$  表示预测步长, 它依据输出误差式(1)进行相应的调整, 这样可以得到控制器的输入为:

$$\hat{e}(t) = r(t) - \hat{y}(t) \quad (15)$$

当采用传统 PD 控制策略时, 下一时间段内的输入控制量为:

$$U_p(jT+T) = U(jT) + k_p \hat{e}(jT+T) + k_d \Delta \hat{e}(jT+T) \quad (16)$$

可见, 本文所提出的自适应灰色预测控制策略通过动态调整预测步数, 并采用等维新息 GM(1,1)模型, 可以提高控制算法对网络延时波动的适应能力。

## 2 双倒立摆网络控制系统仿真

本节将采用上节的自适应灰色预测策略对一类 MIMO 系统进行控制, 以验证本文所提方法的有效性。为了便于分析, 实验对象考虑采用一个远程控制器同时控制两个倒立摆, 其原理图如图 2 所示。

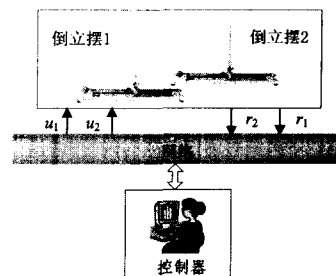


图 2 仿真实验原理示意图

由于灰色预测模型  $GM(n, m)$  的计算量将随着灰模型常微分方程的阶次  $n$  和灰变量数  $m$  的增大成指数增加, 因此, 本节灰色预测控制器将选用传统  $GM(1, 1)$  结构来对系统的输出趋势进行预测。通过自适应切换开关调整灰色预测步长, 当系统输出跟踪误差较小 ( $e(t) < e_s$ ) 时, 切换开关选择大的正步长, 以减小系统输入控制量, 从而降低系统的超调; 反之, 当系统输出跟踪误差较大 ( $e(t) > e_l$ ) 时, 切换开关选择负步长, 以增加系统输入控制量, 提高系统的快速性; 而当系统输出跟踪误差处于两者之间 ( $e_s < e(t) < e_l$ ) 时, 切换开关选择较小的正步长。具体切换结构如下:

$$p = \begin{cases} p_1 = -5 & \text{if } e(t) > 0.6R_{\text{参考值}} \\ p_2 = 4 & \text{if } 0.1R_{\text{参考值}} < e(t) < 0.6R_{\text{参考值}} \\ p_3 = 10 & \text{if } e(t) < 0.1R_{\text{参考值}} \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $p$  表示灰色预测器的预测步长。

按照式(14)对网络控制系统输出进行预测, 可以得到系统的输出预测值为:

$$y_p^* = \begin{cases} \left( \frac{1-0.5a}{1+0.5a} \right)^{n-5-2} \frac{b-ay^{(0)}(1)}{1+0.5a} & e(t) > 0.6R_{\text{参考值}} \\ \left( \frac{1-0.5a}{1+0.5a} \right)^{n+6-2} \frac{b-ay^{(0)}(1)}{1+0.5a} & 0.1R_{\text{参考值}} < e(t) < 0.6R_{\text{参考值}} \\ \left( \frac{1-0.5a}{1+0.5a} \right)^{n+20-2} \frac{b-ay^{(0)}(1)}{1+0.5a} & e(t) \leq 0.1R_{\text{参考值}} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $n$  表示所选预测样本数, 本节中取值为 4。

控制器采用传统 PID 控制策略, 其中,  $k_p = 50$ ,  $k_i = 0$ ,  $k_d = 4$ 。为了测试网络时延对控制系统的影响, 进行了下面两组网络控制仿真试验。

1) 客户机和服务器无网络连接时, 其网络延时可认为是零, 两倒立摆的角度跟踪曲线分别如图 3 和图 4 所示, 其中倒立摆 1 的采样周期  $T=5\text{ms}$ , 倒立摆 2 的采样周期  $T=6\text{ms}$ 。

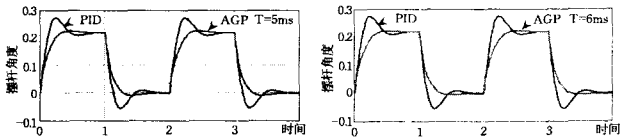


图 3 倒立摆 1 的摆杆角度(无网络) 图 4 倒立摆 2 的摆杆角度(无网络)

图中虚线表示传统的 PID 控制策略所得到的结果, 而实线表示采用自适应灰色预测控制(AGP)所得到的结果。

2) 客户机和服务器有网络连接时, 可测得在校园网环境下的网络时延较为稳定且绝大多数网络延时小于 10ms(其均值为 1.76ms, 方差为 1.31), 如图 5 所示。

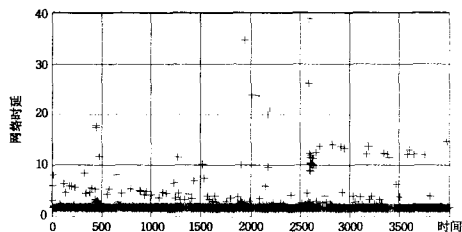


图 5 校园网络时延

将上图的随机网络延时加入到仿真系统中, 可以得到传统 PID 控制和自适应灰色预测控制两种策略下的倒立摆的角度跟踪曲线, 分别如图 6 和图 7 所示。

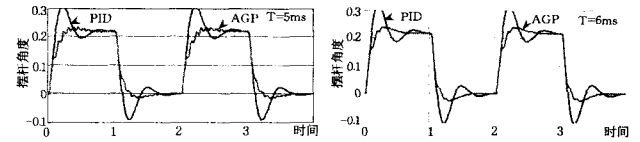


图 6 倒立摆 1 的摆杆角度(有网络) 图 7 倒立摆 2 的摆杆角度(有网络)

比较图 3—图 7 可知, 若系统存在一定网络延时, 采用自适应灰色预测控制策略时的系统性能要比传统的 PID 控制策略好得多, 从而验证了本文所提自适应灰色预测控制策略的可行性、有效性。

**结束语** 本文研究了网络环境下 MIMO 被控对象的一种新颖的自适应灰色预测控制器的设计问题。该方法利用新陈代谢原理建立等维新息  $GM(1, 1)$  模型, 其在线辨识参数较少, 避免了 Diophantine 方程和逆矩阵的在线求解, 从而减少了计算量, 提高了控制系统的实时性。仿真实验证实了所提方法的有效性, 这对网络化环境下 MIMO 被控对象的预测控制问题具有一定的理论研究与实际指导意义。

## 参考文献

- [1] Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays[J]. Automatica, 1998, 34: 57-64
- [2] Gao H, Meng X, Chen T. Stabilization of Networked Control Systems With a New Delay Characterization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2142-2148
- [3] Luck R, Ray A. An observer-based compensator for distributed delays[J]. Automatica, 1990, 26(5): 903-908
- [4] Nilsson J. Real-time control systems with delays [M]. Lund, Sweden: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 1998
- [5] Montestruque L A, Antsaklis P. Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1562-1572
- [6] Almutairi N B, Chow Mo-Yuen. PI parameterization using adaptive fuzzy modulation (AFM) for networked control systems. II. Full adaptation[C]// IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. Sevilla, Spain, Nov. 2002: 3158-3163
- [7] 王柱锋, 蒋静坪, 李丽春. 长延时网络控制系统预测函数控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 129(15): 1006-1010
- [8] 李春茂, 肖建, 张玥. 基于 LS-SVM 的网络化控制系统自适应预测控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15): 3494-3498, 3502
- [9] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
- [10] 刘坤. 直线双倒立摆的双闭环选择型模型控制系统[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(6): 87-89