

文章编号: 1000-8152(2002)06-0897-04

六辊 UC 轧机轧制过程混沌的轨迹跟踪控制

任海鹏, 刘 丁

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 采用基于精确反馈线性化的轨迹跟踪控制方法控制六辊 UC 轧机轧制过程中存在的混沌现象. 这种方法可以根据工业过程或工艺的要求将工业混沌系统控制到任意点或跟踪给定函数, 在具有测量噪声和模型误差的情况下控制仍然有效. 仿真结果说明了该方法的有效性和可行性.

关键词: 六辊 UC 轧机; 板形控制; 混沌; 反馈线性化; 轨迹跟踪

中图分类号: TP310.5 **文献标识码:** A

Tracking control of chaos in the rolling process of a 6-high UC mill

REN Hai-peng, LIU Ding

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The tracking control based on exact feedback linearization is proposed to control chaos existing in the rolling process of 6-high UC mill. This approach can control the industrial chaos at arbitrary point or track function input according to requirements of industrial process or technics, and its effectiveness is not subject to noise and model error. Simulation result proves that the approach is effective and feasible.

Key words: 6-high UC mill; flatness control; chaos; feedback linearization; tracking control

1 引言(Introduction)

随着混沌研究的深入,人们发现混沌是一种自然界广泛存在的现象.例如气象学和物理学中的 Lorenz 混沌,生态学中的虫口(Logistic)模型,电路系统中的蔡氏电子线路混沌等.在控制工程领域中,文献[1]中研究了工业过程混沌稳态的存在性问题,证明了工业过程中存在混沌稳态.文献[2]中研究电机运动系统中的混沌特性,证明了电机运动系统中存在混沌现象.文献[3,4]中研究了六辊 UC 轧机轧制过程的混沌运动,指出了轧制过程中存在混沌现象.

对于控制工程中存在混沌现象的控制,文献[5]中采用基于局部线性化方法的参数微调最优控制将液位混沌系统控制到系统方程的不动点.文献[6]采用物理学家们提出的 OGY 方法,将轧制过程中的混沌控制到了混沌运动的周期轨道.这些方法都存在一个不足,就是控制目标必须是系统的不动点或周期轨道,但是这些不动点或周期轨道,不一定是工业过程或工艺所要求的控制目标,而且工业过程中的控制目标常常是变化的,这时文献[5,6]中的方法都

不适用.

本文首先简要介绍了六辊 UC 轧机轧制过程中的混沌现象,然后提出采用基于精确反馈线性化的轨迹跟踪控制方法对轧制过程中的混沌现象进行了控制.这种控制方法的控制目标可以是固定点也可以是连续的函数.文中还仿真研究了模型误差和测量干扰对控制的影响,指出在存在模型误差和噪声干扰时该控制方法仍然有效.

2 轧制过程的混沌现象(Chaos in rolling process)

文献[3]中研究了六辊 UC 轧机轧制过程中二次板型、四次板型等板形描述量随时间变化的趋势图、混沌相图和递次振幅图,得到了板形描述量具有混沌分岔特性的结论,并给出了经过线性变换后的二次板形控制量的叠代模型如下:

$$x_{n+1} = rx_n \exp(1 - x_n^2). \quad (1)$$

其中 $r \sim N(0.85, 0.53)$, r 变化时系统的混沌分岔图如图 1 所示:

由图1可见当 $r = 0.3$ 时系统状态开始分岔, 到达 $r = 1.5$ 时系统完全处于混沌状态. 这时控制量忽大忽小, 因其影响出口板形会忽好忽坏, 板形控制精度只能在一定范围内变化, 轧制中的混沌状态和其它随机干扰的作用是轧机到达一定精度之后无法再提高的原因. 文献[3]中由此提出了“轧不精原理”, 即在系统处于混沌状态时, 要得到理想的轧制精度是十分困难的, 甚至是不可能的.

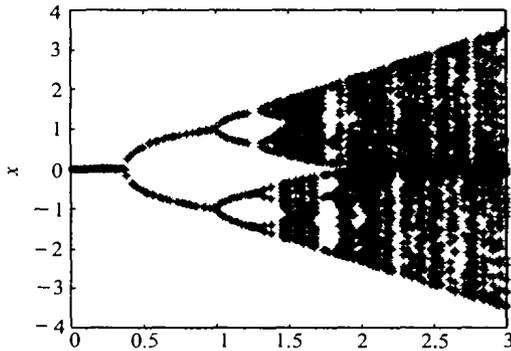


图1 轧制过程混沌分岔图

Fig. 1 Chaotic bifurcation in rolling process

针对上述混沌, 文献[5]采用 OGY 控制方法将其控制到系统的不动点. 文献[4]应用符号动力学方法研究了该模型的轨道, 为该混沌的 OGY 控制确定了不稳定轨道和参数混沌区. 但是 OGY 控制的问题在于只能将系统控制到不动点或是不稳定周期轨道, 而系统的不动点不一定是工程实际中所要求的控制目标. 为了解决这个问题本文提出基于精确反馈线性化方法的轨迹跟踪控制方法.

3 基于非线性反馈线性化的轨迹跟踪控制 (Tracking control based on nonlinear feedback linearization)

分析系统混沌现象的产生原因可知, 系统运动方程中的非线性项的存在, 是产生混沌的根本原因. 如果能通过反馈消去系统运动方程中的非线性项, 使系统方程变为线性系统, 就可以通过线性系统的分析和设计方法, 实现对混沌的控制.

为了不失一般性, 考虑单输入单输出输入输出可线性化系统:

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= A_c \zeta + B_c \frac{1}{\beta(\zeta)} [u - \alpha(\zeta)], \\ y &= C_c \zeta. \end{aligned} \quad (2)$$

其中 ζ 为 n 维状态变量, (A_c, B_c) 是可控的, $\alpha(\zeta)$, $\beta(\zeta)$ 为 ζ 的非线性连续可微的函数阵, $\beta(\zeta)$ 在 ζ 的定义域内为非奇异.

对于不具有式(2)标准形式的输入输出可线性

化系统可以通过微分同胚变换将其变换为式(2)的形式^[7].

设计一个轨迹跟踪控制使输出 y 跟踪给定 y_R , 并假定:

1) $y_R, y_R', \dots, y_R^{(n)}$ 在 $t \geq 0$ 时是有界的, 并且 $y_R^{(n)}(t)$ 分段连续;

2) $y_R, y_R', \dots, y_R^{(n)}$ 可以在线获得的.

令

$$Y_R = \begin{bmatrix} y_R \\ \vdots \\ y_R^{(n-1)} \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} \zeta_1 - y_R \\ \vdots \\ \zeta_n - y_R^{(n-1)} \end{bmatrix} = \zeta - Y_R,$$

利用变量变换将式(2)转换为:

$$\dot{e} = A_c e + B_c \left\{ \frac{1}{\beta(\zeta)} [u - \alpha(\zeta)] - y_R^{(n)} \right\}. \quad (3)$$

取非线性状态反馈控制规律如下:

$$u = \alpha(\zeta) + \beta(\zeta) [v + y_R^{(n)}]. \quad (4)$$

可以将式(3)线性化为如下形式:

$$\dot{e} = A_c e + B_c v. \quad (5)$$

对于式(5)所示的线性系统, 设计一个状态反馈控制 $v = Ke$, 使得 $A_c + B_c K$ 为胡尔维茨(Hurwitz)矩阵, 于是式(5)变为:

$$\dot{e} = (A_c + B_c K) e. \quad (6)$$

式(6)为全局稳定的, 而且通过选择 K 可以控制跟踪误差的衰减速度, 从而控制了跟踪效果.

这种方法采用非线性反馈将系统线性化为线性系统, 在应用线性系统的设计方法设计轨迹跟踪控制, 这种控制是全局收敛的.

4 仿真结果(Simulation results)

对于式(1)混沌系统, 参数 $r = 2.55$, 采用3小节中所述轨迹跟踪控制, 设计过程如下:

给式(1)所示的二次板形控制量加一控制 u_n , 则式(1)变为如下形式:

$$x(n+1) = rx(n) \exp(1 - x(n)^2) + u(n). \quad (7)$$

设

$$e(n) = x(n) - x_r(n), \quad (8)$$

由式(4)取反馈控制规律如下

$$u(n) = x_r(n+1) - rx(n) \exp(1 - x(n)^2) + ke(n). \quad (9)$$

由式(7), (8), (9)得:

$$e(n+1) = ke(n). \quad (10)$$

取 $|k| < 1$, 则闭环系统误差 $e(n)$ 渐进稳定到平衡点 $e(n) = 0$, 系统可实现给定的跟踪控制.

取给定值为恒值 $x_r(n) = 1$, 采用式(9)所示控制量进行控制, 为了消除初值效应, 在第 200 步加入控制量, 系统输出和加入控制之后的误差如图 2 所示, 图 2(a) 为系统输出, 图 2(b) 为加入控制之后的误差. 图 2 中可见采用精确反馈线性化轨迹跟踪控制方法可以控制混沌系统到某一给定恒值.

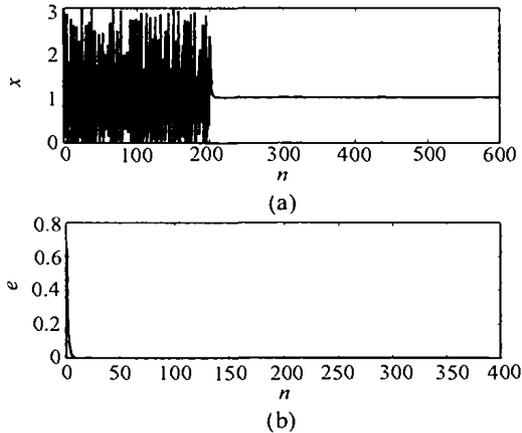


图 2 控制混沌跟踪恒值给定

Fig. 2 Control chaos to track a constant value

取给定为一正弦函数:

$$x_r(n) = 1 + 0.5\sin(3.14n/50), \quad (11)$$

采用式(9)进行控制, 在第 200 步时施加控制, 控制结果如图 3 所示.

图 3 中(a)为系统输出, (b)为加入控制之后的误差. 从图 3 中可见系统可以很好地跟踪给定正弦信号. 图 3 也说明了精确反馈线性化轨迹跟踪控制方法的有效性.

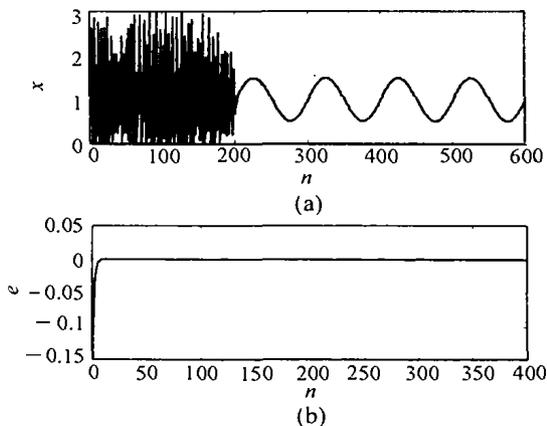


图 3 控制混沌跟踪正弦给定

Fig. 3 Control chaos to track sinusoidal input

对于一个实际的工业控制系统难免存在数据的测量干扰和模型的不确定性, 因此要求一个有效可行的控制策略必须具有强的鲁棒性(Robustness). 下面仿真研究精确反馈线性化轨迹跟踪控制方法对于测量干扰和模型参数的鲁棒性.

在测量值中加入幅值为 0.05 的随机测量干扰, 给定仍为式(11), 在第 200 步加入控制, 控制的结果如图 4 所示, 图 4(a) 为系统输出, 图 4(b) 加入控制后系统的跟踪误差. 从图 4 可见精确反馈线性化轨迹跟踪控制方法在具有测量噪声时仍然能够控制混沌系统跟踪给定信号, 只是控制的精度要取决于检测的精度.

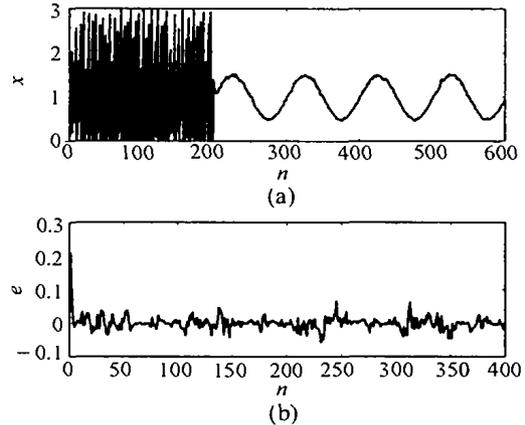


图 4 噪声环境下跟踪正弦给定

Fig. 4 Track sinusoidal input under noise environment

当存在模型误差时, 采取精确反馈线性化轨迹跟踪控制方法的控制效果进行了研究. 实际系统参数为 $r = 2.5$, 在控制模型中实际取参数 $r_1 = 2.475$, 取给定正弦函数为:

$$x_r(n) = 1.9\sin(3.14n/50). \quad (12)$$

在第 200 步加入控制, 控制结果如图 5 所示, 图 5(a) 为系统输出, 图 5(b) 为加入控制后的系统跟踪误差.

模型实际参数仍为 $r = 2.5$, 控制中取参数 $r_1 = 2.525$, 在测量值中加入幅值为 0.05 的随机测量干扰, 给定仍如式(12)所示, 采用精确反馈线性化轨迹跟踪控制方法对系统进行控制, 控制结果如图 6 所示, 图 6(a) 为系统输出, 图 6(b) 为加入控制之后的误差.

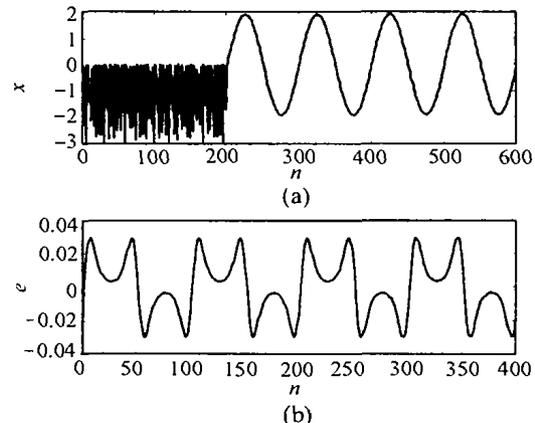


图 5 参数扰动下跟踪正弦给定

Fig. 5 Track sinusoidal input with parameter perturbation

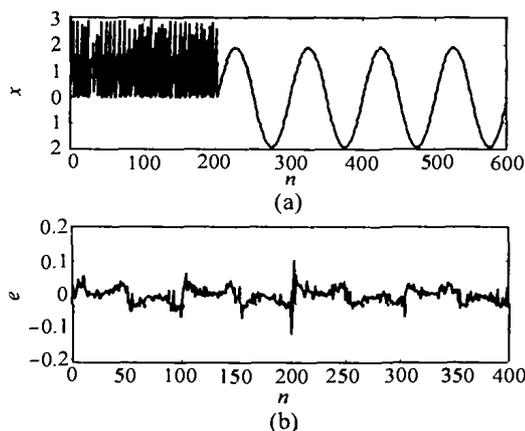


图6 鲁棒性实验结果

Fig. 6 Robustness experiment result

从图6可见,精确反馈线性化轨迹跟踪控制在具有测量噪声和参数扰动的情况下仍然有效,只是控制的精度会因此降低.

5 结论(Conclusions)

本文采用精确反馈线性化轨迹跟踪控制方法对六辊UC轧机轧制过程中的混沌现象进行了控制,该方法的特点是:

- 1) 可以控制混沌系统跟踪连续的给定函数.
- 2) 控制对于参数扰动和测量噪声具有较强的鲁棒性.

参考文献(References)

[1] Luo Xuguang, Han Congzhao, Wang Baiwu. Research on the chaotic

steady state for industrial processes [J]. Acta Automatic Sinica, 1999, 25(3): 393 - 396 (in Chinese)

- [2] Cao Zhitong, Zheng Zhongsheng. The chaos of nonlinear moving system for the synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(5): 319 - 322 (in Chinese)
- [3] Zhu Weiyong, Liu Xiangdong, Wang Guodong. Chaotic character in the rolling processes of a 6-high UC mill and dynamic analysis of its quantitative criterion [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1997, 9(5): 17 - 20 (in Chinese)
- [4] Zhu Weiyong, Wang Dejie, Yu Hai. Analysis of dark-lines equation and MSS sequences for 6-high UC mill chaotic dynamics model [J]. Journal of Northeastern University (Nature Science), 2000, 21(5): 465 - 468 (in Chinese)
- [5] Wang Zongyong, Cai Yuanli, Liu Wenjiang. Optimal control of chaotic motions in liquid level regulation system [J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(2): 258 - 261 (in Chinese)
- [6] Yan Dejun, Liu Xiangdong, Zhu Yongwei. OGY chaos control method of six rolls UC mill [J]. Control and Decision, 1999, 14(2): 156 - 160 (in Chinese)
- [7] Hassan K K. Nonlinear Systems (Second Edition) [M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996

本文作者简介

任海鹏 1975年生.现为西安理工大学博士研究生.研究方向为工业过程控制,智能控制理论及应用. Email: renhaipeng@xaut.edu.cn

刘丁 1957年生.1997年获西安交通大学系统工程研究所博士学位.现为西安理工大学副校长,教授,博士生导师.长期从事工业自动化、智能控制理论与应用等方面的研究.目前承担多项国家重点科研任务.发表论文30余篇,获国家及省部级科技进步奖4项.