

自适应逆控制策略在 IC 材料切片设备中的应用

汤 睿, 刘宏立, 戴瑜兴, 张义兵, 蒋 近

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

摘 要: 针对数字 PID 控制系统在高速同步伺服控制系统应用中存在的跟随误差和控制精度问题, 提出了一种自适应逆控制策略, 该方法以主电机为参考模型, 通过 LMS 自适应控制算法调整控制器, 使放线电机与主电机具有类似的动态特性. 仿真结果与产品的检测结果表明系统能有效减小随动误差, 提高控制系统的精度.

关键词: 自适应逆控制; 伺服电机; LMS 算法; 数控多线切割机床

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 12-2482-04

Adaptive Inverse Control Strategy and Its Application in IC Material Slicing Equipment

TANG Rui, LIU Hongli, DAI Yuxing, ZHANG Yibing, JIANG Jin

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

Abstract: Aiming at the existed following error and control precision problem of numerical PID control system in high speed synchronous servo control system, a set of adaptive inverse control strategy was put forward. Using host motor as reference model and LMS adaptive control algorithms adjusting controller, the proposed method made supply motor have approximate dynamical property with host motor. The simulation results and product detecting results demonstrate that the proposed system can effectively reduce the following error and increase the precision of control system.

Key words: adaptive inverse control; servo motor; LMS algorithms; numerical control multi-wire saw

1 引言

IC (integrated circuit) 产业的迅速发展, 传统 IC 材料切片设备多刀切割机和内圆切割机的生产能力已不能满足 IC 产业发展对 IC 材料切片需求量的要求. 数控多线切割机床凭借其高精度、高效率、低损耗的特点迅速成为 IC 材料切片的主流设备. 多线切割机床是一种通过金属线的高速往复运动把磨料带入硅锭加工区域进行研磨切割, 将硅锭一次性切割成数百上千片薄片的新型硬脆材料切割加工设备.

多线切割机床运行时, 切割线从放线轮经过主动轮, 在主动轮完成切割, 由收线轮收回. 多电机同步控制技术是多线切割机床研制的关键技术. 传统的多电机同步控制一般采用数字 PID 控制方式, 由于数字 PID 控制是一种反馈控制, 应用于多电机同步跟随控制时, 主电机和放线电机始终存在采样时间的延时, 在主电机和放线电机处于换向加减速阶段时, 不可避免的存在跟随误差, 跟随误差将造成主电机线速度和放线电机线速度的

不同步, 从而引起张力的波动甚至切割线断线. 因此需要采用先进的多电机同步控制策略来实现数控多线切割机床的多电机同步控制.

2 自适应逆控制策略

2.1 基本原理

自适应逆控制 (Adaptive Inverse Control) 策略是由美国斯坦福大学著名教授 B. Widrow 提出的. 该方法克服了常规控制算法所要求的具有先验的被控对象精确模型和逆必须存在的难题, 且已成功应用于复杂系统的控制. 自适应逆控制的基本思想就是要用一个来自控制器的信号去驱动对象, 而该控制器的传递函数就是该对象本身传递函数的逆.

有时要求的不是对象输出跟踪指令输入本身, 而是要跟踪一个延迟或平滑过的指令输入, 平滑模型一般称为参考模型, 可以用图 1 来表示.

根据图 1 可知, 如果自适应控制器的控制结果是使得均方误差最小, 那么, 控制器和对象的级联在收敛后

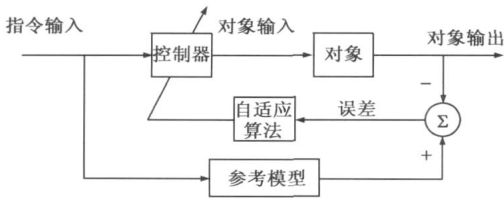


图1 参考模型自适应逆控制

将有类似于参考模型的动态响应特性, 控制器和对象传递函数的乘积将非常近似于参考模型的传递函数^[1]。

212 自适应滤波器

自适应滤波理论被认为是自适应逆控制的基础。无论是在对象建模、对象逆建模还是对象扰动的消除, 都要用到自适应滤波理论。

这里给出了一种由可变加权系数的抽头延迟线、加法器和一个自适应过程所构成的自适应滤波器^[2], 它包含有一个输入信号和一个输出信号, 而且还有一个特别的输入信号/误差 ϵ_k , 其基本结构如图 2 所示。

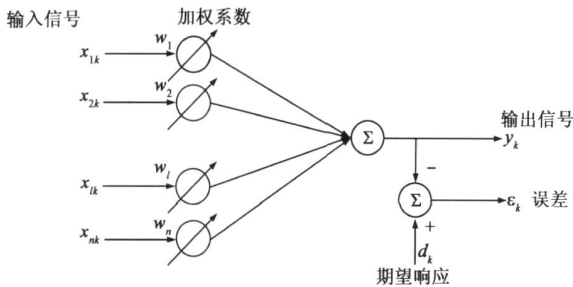


图1 自适应滤波器原理

图 2 所示的自适应滤波器是因果的, 具有有限长脉冲响应(FIR)。通过将自适应滤波器的输出 y_k 与期望响应输出 d_k 相比较, 得到一个误差信号 ϵ_k , 通过某种自适应算法来调节自适应滤波器的可变加权系数 w_1, w_2, \dots, w_n 以使得输入信号经过自适应滤波器后的输出与经过某对象后的输出相似, 即使自适应滤波器与某对象具有相似的传递函数。

213 自适应逆控制的应用

自适应逆控制用被控对象的逆模型作为控制器, 其建模方法以自适应信号处理理论为基础, 借助于自适应滤波方面的一些知识, 自适应逆控制很容易理解, 并且在实际中容易应用。自适应逆控制是一种简单的、鲁棒而且精确的自适应控制形式^[3]。目前, 自适应逆控制已应用到机器人控制、振动系统和扰动消除、船舶自动舵的控制、飞机和卫星姿态控制等^[4~5]方面。其中最具有代表性的应用就是美国能源部在斯坦福大学的斯坦福直线加速器中心(SLAC)的电子束控制中的自适应噪声消除系统。一个 8 输入 8 输出的自适应消除器, 被用于实时控制 2 英里长的高能线性加速器中的离子束, 使

离子束的位置被控制在 1Lm 的范围内^[6~7]。

3 IC 材料切片设备的自适应逆控制

311 IC 材料切片设备的多电机同步要求

IC 材料切片设备数控多线切割机床工作时, 放线侧等效示意图如图 3 所示。主动轮以设定的线速度高速往复旋转, 为了保证切割线上的张力恒定, 放线轮就必须准确地跟随主动轮的线速度变化。

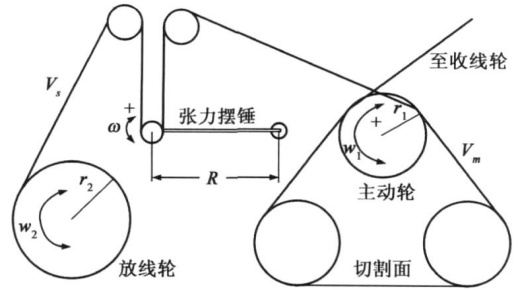


图3 数控多线切割机床机械系统放线侧等效示意图

数控多线切割机床的控制系统复杂, 切割线走线系统是其核心部分。切割线在切割过程中的抖动和张力波动直接影响切割加工的精度。假设理想情况, 即放线轮完全正确地跟随主动轮的旋转, 则有:

$$\text{主动轮线速度: } v_m = \omega_1 @ r_1 \quad (1)$$

$$\text{放线轮线速度: } v_s = \omega_2 @ r_2 = v_m \quad (2)$$

$$\text{张力摆杆角速度: } \omega = (v_m - v_s) / 2R = 0 \text{ rad/s} \quad (3)$$

但是, 由于数控多线切割机床处于工作状态时, 放线轮的半径会因为切割线的减少而逐渐变小、收线轮的半径会逐渐变大, 罗拉的半径由于损耗也会变小, 造成 r_2 的变化, 半径变化导致电机线速度与角速度之间关系的变更; 同时因为切割线的减少, 造成转动惯量的变化, 引起电机固有加速时间的变化。这就要求控制系统能够具有较强的鲁棒性和自适应能力。

312 自适应逆控制系统的设计

31211 应用自适应逆控制系统的数学模型

为了解决数字 PID 控制在电机加减速阶段的控制精度问题, 以主电机 $P_m(z^{-1})$ 为模型参考, 采用自适应算法控制器 $C(z^{-1})$, 使被控对象 $P_f(z^{-1})$ 与控制器级联后构成的等效系统的与参考模型(即主电机)具有相似的动、静态特性, 如图 4 所示, 在不考虑噪声和扰动的理想情况下存在:

$$C(z^{-1}) = \frac{P_m(z^{-1})}{P_f(z^{-1})} \quad (4)$$

在建立了主电机与放线电机的自适应逆控制模型后, 就要选择合适的自适应算法来自动调节控制器的加权系数, 即完成对控制器的自适应。对于图 4 的系统, 可以选择微分最速下降(DSD)算法和线性随机搜寻(LRS)算法。LRS 算法收敛要比 DSD 算法慢一倍, 而且

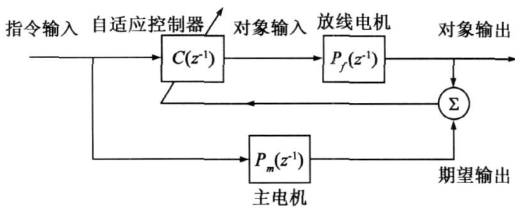


图4 主电机与放线电机的自适应逆控制框图

相比 LMS 算法, 这两种算法的收敛速度都是极慢的^[8~9]. 因此, 当然希望在该系统中适用 LMS 算法.

3.12.2 自适应控制器的 LMS 算法

LMS 算法并不能直接应用到图 4 的系统中, 因为图 4 给出的误差信号是针对对象输出的误差信号, 而 LMS 算法需要的误差信号是针对对象输入的, 即自适应控制器的输出. 为了利用收敛速度快的 LMS 算法, 将图 4 的系统作调整, 使得可以用误差信号直接对控制器作自适应.

图 5 将对象和它的逆模型交换, 使得可以用误差信号直接对控制器作自适应. 得到自适应控制器后, 就可以用一个完全的复制自适应控制器作为对象的控制器.

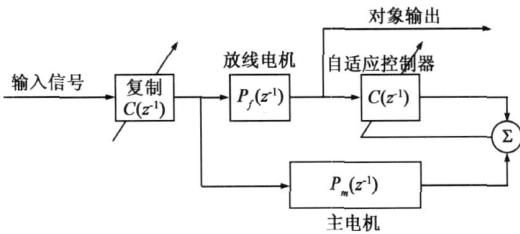


图5 适用LMS算法的主电机与放线电机自适应逆控制框图

观察图 2 可得:

$$\text{输入向量: } X_k = [x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk}]^T \quad (5)$$

$$\text{加权系数向量: } W^T = [w_1, w_2, \dots, w_n] \quad (6)$$

那么第 k 个输出信号:

$$y_k = \sum_{i=1}^n w_i x_{ik} = W^T X_k = X_k^T W \quad (7)$$

假设输出信号和期望响应都是平稳且各态遍历的过程, 那么第 k 次采样的误差就是:

$$E_k = d_k - y_k = d_k - W^T X_k = d_k - X_k^T W \quad (8)$$

误差的平方为:

$$E_k^2 = d_k^2 - 2d_k X_k^T W + W^T X_k X_k^T W \quad (9)$$

均方误差 N 为:

$$N > E[E_k^2] = E[d_k^2] - 2E[d_k X_k^T] W + W^T E[X_k X_k^T] W = E[d_k^2] - 2P^T W + W^T R W \quad (10)$$

其中: $P > E[d_k X_k]$ (11)

$R > E[X_k X_k^T]$ (12)

由式(10)可看出, 均方误差性能函数是加权系数的二次型函数, 具有碗状0的曲面, 碗状0曲面的底部就对应了最小的均方误差, 而自适应的过程就是不断调整加权系数以寻找碗状0底部.

利用 LMS 算法求得最小均方误差的过程就是不断调整加权系数的过程, 其算法公式为:

$$W(n) = W(n-1) + f(X_k, E_k, L) \quad (13)$$

$$f(X_k, E_k, L) = L E_k X_k^T \quad (14)$$

其中标量参数 L 是收敛因子, 控制了 LMS 算法的稳定性和自适应速度.

4 控制系统的仿真实验及产品检测结果

4.1 LMS 自适应逆控制算法在主电机与放线电机系统中的仿真

在数控多线切割机床走线过程中, 切割线每分钟往复 6~16 次, 从正向 600m/min 到负向 600m/min 的加减速时间为 1 秒左右, 分析速度信号的功率谱可知速度信号的能量主要集中在 0.12Hz 以下的分量上. 设采样频率为 500Hz.

根据自动控制理论, 对于交流伺服电机, 可以将伺服驱动器和伺服电机看作一个整体, 其传递函数为:

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (15)$$

K 为系统的传递系数, T 为系统的机电时间常数.

根据实际开发样机的情况, 设定仿真参数如下:

$$P_1(s) = \frac{0.85}{0.05s + 1} \quad (16)$$

$$P_2(s) = \frac{1}{0.04s + 1} \quad (17)$$

作 z 变换离散化后为:

$$P_1(z^{-1}) = \frac{0.0333z^{-1}}{1 - 0.9608z^{-1}} \quad (18)$$

$$P_2(z^{-1}) = \frac{0.0488z^{-1}}{1 - 0.9512z^{-1}} \quad (19)$$

设速度指令为幅度 100m, 频率 4rad/s 的正弦波和带限白噪声的叠加信号, 分别采用数字 PID 控制和自适应逆控制进行仿真, matlab 仿真结果如图 6 所示. 结果

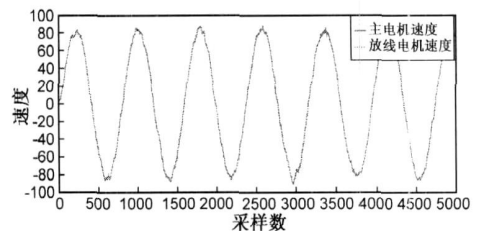
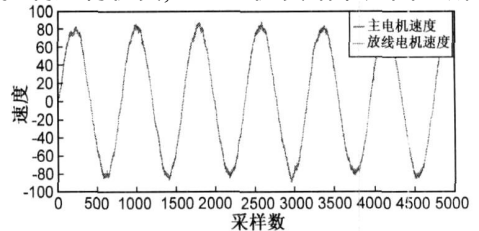


图6 数字PID控制和自适应逆控制仿真结果比较

表明, 采用 LMS 自适应算法的主电机和放线电机同步自适应逆控制系统能够减小随动系统的跟随误差, 提高系统的控制精度。

4.1.2 产品检测结果

自适应逆控制算法成功应用于作者开发的 XQ300A 数控多线切割机床^[10], 提高了多电机同步跟随系统的控制精度, 其控制精度可以直接由减小的张力波动反映。

图 7 给出了切割线走线速度为 500 米/分钟的情况下, 产品放线侧的张力波动检测结果。

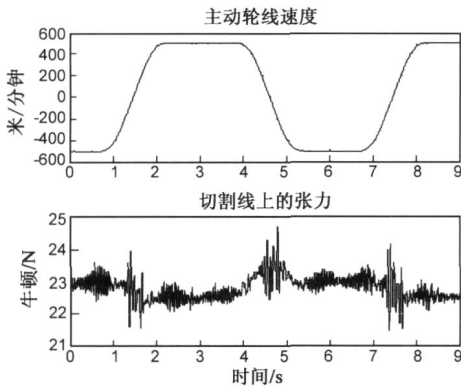


图7 走线速度为500米/分钟的张力波动检测结果

产品通过湖南省机械产品质量监督检测总站的检测, 检测报告显示, 机床以 450m/min 的走线速度运行时, 张力控制精度为 $\pm 0.17N$ 。检测结果表明该控制系统主要性能指标均达到或超过国际同类产品水平。

5 结束语

自适应逆控制策略在 IC 材料切片设备上的应用, 从根本上消除了采用数字 PID 控制的系统由于采样延迟造成的跟随误差; 用类似开环的控制方式实现了高精度的控制效果; 由于自适应控制器具有实时调节加权系数的能力, 在系统机械参数发生变化时, 通过控制器的自适应, 同样能够保证系统控制精度。自适应逆控制策略在数控多线切割设备上的成功应用, 对于纺织机、印刷机、绕卷机等需要速度同步控制的设备的控制系统开发具有一定的理论意义和参考价值。

参考文献:

[1] Plett Gregory L. Adaptive inverse control of linear and nonlinear systems using dynamic neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2003, 14(2): 360- 376

[2] Kaelin. August, von Grunigen. Daniel. On the use of a priori knowledge in adaptive inverse control[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems Part I, 2000, 47(1): 54- 68

[3] Widrow B, Walach E. 刘树棠, 韩崇昭, 译. 自适应逆控制

[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.

(Widrow B, Walach E. Translated by Liu Shutang, Han Chongzhao. Adaptive Inverse Control[M] Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 2000. (in Chinese)

- [4] 袁朝辉, 王卉, 李凌. 自适应逆控制在液压伺服系统中的应用[J]. 机床与液压, 2007, 35(1): 185- 189.
Yuan Zhachui, WANG Hui, Li Ling. Adaptive inverse control and its application in dynamoelectric servo system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, 35(1): 185- 189. (in Chinese)
- [5] 郭飞, 李华德. 基于 Elman 网络的自适应逆控制电极调节系统[J]. 煤矿机械. 2007, 28(10): 131- 133.
Guo Fei, Li Hua2de. Adaptive inverse control electrode regulation system based on elman neural network, Coal Mine Machinery, 2007, 28(10): 131- 133. (In Chinese)
- [6] 伏祥运, 曾繁鹏, 王建隰, 牟宪民, 纪延超. STATCOM 的自适应逆控制方法[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(6): 636- 640.
Fu Xian2yun, Zeng Fan2peng, Wang Jian2ze, Mou Xian2min, Ji Yan2chao. Adaptive inverse control for STATCOM[J]. Electric Machines And Control. 2006, 10(6): 636- 640. (in Chinese)
- [7] 毛六平, 王耀南, 孙炜, 戴瑜兴. 一种递归模糊神经网络自适应控制方法[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2285- 2287.
Mao Liu2ping, Wang Yao2nan, Sun Wei, Dai Yu2xin. An adaptive control using recurrent fuzzy neural network[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2285- 2287. (in Chinese)
- [8] Yu L H, Fang J C, Wu C. Magnetically suspended control moment gyro gimbal servo system using adaptive inverse control during disturbances[J]. Electronics Letters, 2005, 41(17): 1- 2
- [9] Hui Wang, Daoying Pi, PYouxian Sun. Online SVM regression algorithm2based adaptive inverse control [J]. Neurocomputing. 2007, 70(4- 6): 952- 959
- [10] 戴瑜兴, 汤睿, 张义兵, 蒋近. 数控多线切割技术及发展趋势[J]. 电子工业专用设备, 2007, 36(11): 1- 4.
Dai Yu2xing, Tang Rui, Zhang Yi2bing, Jiang Jin. Numerical control multi2wire sawtechnology and development trend[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2007, 36(11): 1- 4. (in Chinese)

作者简介:



汤 睿 男, 1980 年生于湖南长沙, 湖南大学电气与信息工程学院博士研究生。主要研究方向: 信号处理与智能控制。
E2mail: hntu6772@163.com