

渐消记忆递推辨识实现的木材进锯自校正控制系统

方一鸣 王洪瑞 杨景明 焦晓红

(燕山大学自动化系·秦皇岛, 066004)

摘要: 针对木材锯割过程中被控对象参数随木材直径、硬度等因素而变化的特点, 本文提出了一种适于木材进锯自动控制应用的辨识及自校正控制算法. 该方法利用恒低速进锯阶段辨识估计获得对象参数初值. 在此基础上, 应用渐消记忆递推算法进行闭环自校正控制, 以保证带锯交流电机负载电流在工艺条件允许的最大电流下工作, 从而确保木材锯割的质量和产量, 提高经济效益. 现场应用结果表明, 该辨识及自校正控制算法准确、系统设计合理、工作可靠.

关键词: 渐消记忆递推算法; 自校正控制; 木材进锯控制; 带锯电机负载电流; 微机实现

1 引言

制材是木材加工业的基础, 制材精度的提高主要着眼于两方面的控制指标, 即横向控制指标和纵向控制指标. 横向控制即摇尺控制^[1], 其目的在于保证木材的横向板厚精度. 纵向控制就是指木材的进锯速度控制, 其目的在于保证木材沿长度方向的平直精度, 且最大限度地发挥带锯机的效率, 同时提高生产质量和产量. 关于横向摇尺控制, 国内研究较多, 1988 年大兴安岭新林林业局成功地研制了木材厚度微机摇尺控制系统. 而对于纵向速度进锯控制的研究, 国内尚属空白. 为此我们利用自校正控制技术和计算机控制技术, 成功地开发研制了一套木材进锯控制系统, 并成功应用于大兴安岭新林林业局木材综合利用加工厂生产现场.

2 木材锯割控制系统的工艺和组成

图 1 为木材锯割控制系统的结构示意图. 木材纵向锯割控制系统工艺过程为:

带锯主机由三相交流电动机拖动(带锯交流电机非锯割时电流, 即空载电流为 I_0 , 约为 18A), 以一定的切削速度高速转动, 装载着原木的跑车从装料位正向行至锯口, 低速进锯, 一般低于 8m/min (以免锯条跑偏甚至折断), 等锯条平直地进入木材后, 再升速并在带锯工艺条件允许的最

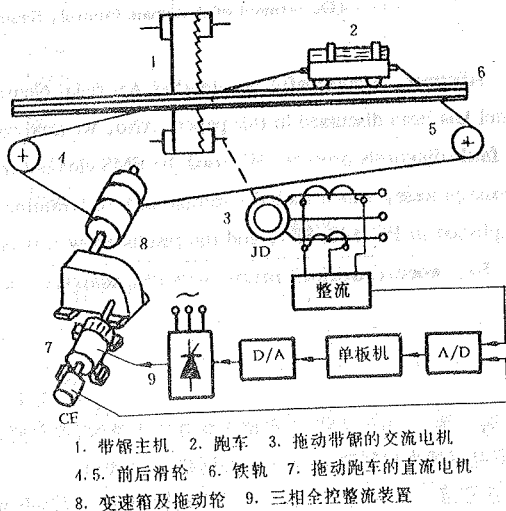


图 1 锯木系统结构示意图

大电流下快速进锯、锯割木材,以保证木材锯割的质量和产量。当原木一次锯割完毕,尾端将走出锯条时,应立即停车,为快速退车作准备。当跑车退至进锯口则停车,重新给出横向板厚后,可进行第二次锯割控制过程。如此重复进行,直至一根原木锯解完毕,再退至装料位,装上原木重复进行木材锯割过程。

木材锯割过程中,控制系统由直流电机的转速电流双闭环控制系统及进锯速度与带锯交流电机负载电流环之间的关系环节(此环节在非锯割过程中不存在)组成,其系统结构方框图如图 2 所示^[2]。

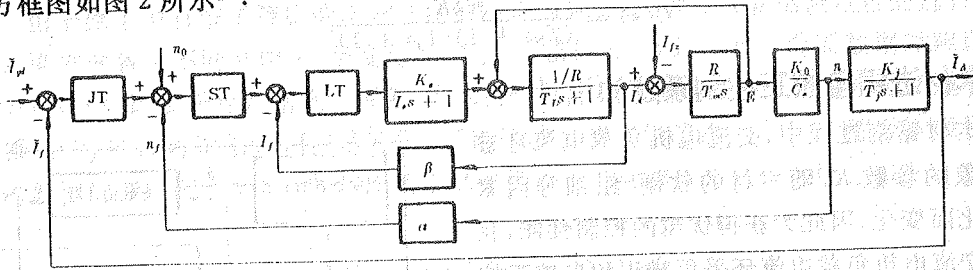


图 2 锯割过程中系统结构框图

图中, JT——交流电机负载电流环调节器; ST——速度环调节器; LT——直流电流环调节器; K_0 ——电机转速(转/分)和跑车线速度(cm/s)之间的转换系数, $K_0 = 0.098$; I_d ——带锯交流电机实际负载电流与空载电流 I_0 之差。

这里需要特别说明的是,进锯速度与带锯交流电机负载电流之间的关系环节:

实际木材锯割过程中,对于同样直径、同样材质、硬度的木材,进锯速度越快,则反映到带锯交流电机上的负载电流就越大,因此从静态角度上讲,进锯速度到带锯交流电机负载电流之间的关系特性,简单的考虑则是一个比例放大环节 K_j ;而在同样进锯速度下,对于直径大、材质硬的木材,则交流电机负载电流就越大,即系数 K_j 就越大,因此 K_j 是随木材直径、材质、硬度等诸因素的不同而不同的,是时变的。在实际锯割控制过程中, K_j 是需要在线辨识估计的。 K_j 的初值是根据 8m/min 低速进锯阶段(此时交流电机负载电流环开环),利用一次完成最小二乘法得到的,在此基础上交流电机负载电流环可闭环控制,且每增加一组新的数据,则进行一次在线辨识估计自校正控制。 T_j 是由于带锯主机上下锯轮质量较大,而引起的带锯交流电机负载电流对进锯速度的惯性响应的时间常数,实际系统中 $T_j = 0.15s$ 。

实际锯割控制系统中,速度环和交流电机负载电流环采用计算机数字量闭环,且采样控制周期分别为 5ms 和 40ms。而直流电流环由快速模拟量系统实现。直流电流环的等效传递函数为

$$G_{LT}(s) = \frac{1/\beta}{2T_{\Sigma}s + 1}, \quad T_{\Sigma} = 6.67ms.$$

速度环按典型 II 型系统设计,其调节器设计成常规 PI 控制器,其传递函数为

$$D_n(s) = k_n \left(1 + \frac{1}{\tau_n s} \right) = 10.7 \left(1 + \frac{1}{0.014s} \right).$$

计算机中离散化速度调节器采用增量式算法:

$$\Delta u(k) = k_n \left(\left(1 + \frac{T}{\tau_n} \right) e(k) - e(k-1) \right),$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k), \quad (1)$$

其中 $u(k)$ ——调节器输出; $e(k)$ ——调节器输入; T ——采样周期, 取 $T=5\text{ms}$. 则速度环等效传递函数为

$$G_{sr}(s) = \frac{K_N}{T_N s + 1},$$

交流电机负载电流环被控对象为

$$G(s) = \frac{K_N K_j}{(T_N s + 1)(T_j s + 1)}. \quad (2)$$

3 木材进锯自校正控制系统的设计

木材锯割过程中, 交流电机负载电流环被控对象的参数 K_j 随木材的软硬、粗细等因素的变化而变化, 因此为获得优越的控制性能, 我们对交流电机负载电流环采用辨识和自校正控制的方法, 其自校正控制系统结构示意图如图 3 所示, 对象包括直流电动机速度闭环和交流电机负载电流与进锯速度之间的一阶惯性环节, 其传递函数见(2)式.

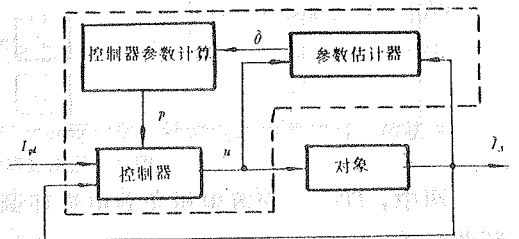


图 3 自校正控制系统结构示意图

3.1 参数估计器的设计^[3]

1) K_j 初值的确定.

交流电机负载电流环参数 K_j 的初值, 我们是利用速度环低速进锯阶段采样的 N 组进锯速度和交流电机负载电流数据, 直接利用一次完成最小二乘估计得到的. 辨识算法推导如下:

由图 2 得

$$\frac{\tilde{i}_A(s)}{n(s)} = \frac{K_j}{T_j s + 1} = \frac{K_j}{T_j} \frac{1}{s + \frac{1}{T_j}},$$

则由 z 变换得^[7]

$$\frac{\tilde{i}_A(z)}{n(z)} = \frac{K_j}{T_j} \frac{1}{1 - e^{-T/T_j} z^{-1}},$$

即有差分方程

$$\tilde{i}_A(k) - e^{-T/T_j} \tilde{i}_A(k-1) = \frac{K_j}{T_j} n(k) = \theta n(k). \quad (3)$$

式中 T ——采样周期, 取 $T=40\text{ms}$; $\theta \triangleq \frac{K_j}{T_j}$, 是待估值.

当 θ 取估计值 $\hat{\theta}$ 时, 输出实际值与估计值之间存在偏差 $e(k)$

$$\tilde{i}_A(k) - e^{-T/T_j} \tilde{i}_A(k-1) = \hat{\theta} n(k) + e(k). \quad (4)$$

令

$$J = \sum_{k=1}^N e^2(k), \quad \frac{\partial J}{\partial \theta} = 0.$$

当采样 N 组数据后, θ 的一次完成最小二乘估值为

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{k=1}^N (\tilde{I}_d(k) - e^{-T/T_j} \tilde{I}_d(k-1)) n(k)}{\sum_{k=1}^N n^2(k)}. \quad (5)$$

$$\text{则} \quad \hat{K}_j = \hat{\theta} T_j. \quad (6)$$

本系统中采样 8 次 n 与 $\tilde{I}_d$ 后, 用公式(6)便计算出 K_j 的初始估计值.

2) K_j 的渐消记忆递推最小二乘辨识估计.

由于原木中有节子等影响木材硬度的随机因素存在, 因此随着锯割过程的进行, 在原木长度方向各个不同部位 K_j 是变化的, 且变化量较大, 因此为减小前面数据对辨识结果的潜在影响, 以及避免数据饱和现象, 本木材锯割自动控制系统中采用渐消记忆递推最小二乘对 K_j 进行辨识估计, 且“遗忘因子”也打破常规选值范围(在 0.95 附近), 根据实际经验数据选遗忘因子为 $\rho=0.6$, 渐消记忆递推最小二乘辨识估计算法推导如下:

令

$$\tilde{I}_d(k) - e^{-T/T_j} \tilde{I}_d(k-1) \triangleq y(k). \quad (7)$$

$$\text{则有} \quad y(k) = \hat{\theta} n(k) + e(k).$$

$$\text{设} \quad \Phi_N = \begin{bmatrix} n(1) \\ n(2) \\ \vdots \\ n(N) \end{bmatrix}, \quad y_N = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}.$$

其中 N 表示辨识用采样输入、输出数据的次数, 则

$$\hat{\theta} = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} \Phi_N^T y_N = \frac{\sum_{k=1}^N y(k) n(k)}{\sum_{k=1}^N n^2(k)}. \quad (8)$$

$$\text{令} \quad P_N = (\Phi_N^T \Phi_N)^{-1} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N n^2(k)}.$$

当新采样一组数据后, 对过去的采样数据乘上一个遗忘因子 $\rho, \rho=0.6$. 即

$$\Phi_{N+1} = \begin{pmatrix} \rho \Phi_N \\ n(N+1) \end{pmatrix}, \quad y_{N+1} = \begin{pmatrix} \rho y_N \\ y(N+1) \end{pmatrix},$$

则

$$P_{N+1} = (\Phi_{N+1}^T \Phi_{N+1})^{-1} = (\rho^2 \Phi_N^T \Phi_N + n^2(N+1))^{-1} = \frac{P_N}{\rho^2 + P_N n^2(N+1)}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{N+1} &= P_{N+1} \Phi_{N+1}^T y_{N+1} = P_{N+1} (\rho \Phi_N^T n(N+1)) \begin{pmatrix} \rho y_N \\ y(N+1) \end{pmatrix} \\ &= P_{N+1} (\rho^2 \Phi_N^T y_N + n(N+1) y(N+1)). \end{aligned} \quad (10)$$

由式(9)代入式(10), 得

$$\hat{\theta}_{N+1} = \hat{\theta}_N + P_{N+1} n(N+1) (y(N+1) - n(N+1) \hat{\theta}_N), \quad (11)$$

$$\hat{K}_j = T_j \hat{\theta}_{N+1} = T_j (\hat{\theta}_N + P_{N+1} n(N+1) (y(N+1) - n(N+1) \hat{\theta}_N)). \quad (12)$$

3.2 自校正 PID 控制器的设计^[4]

交流电机负载电流环被控对象传递函数为

$$G(s) = \frac{\tilde{I}_A(s)}{U(s)} = \frac{K_N K_j}{(T_N s + 1)(T_j s + 1)},$$

则控制过程差分方程为

$$A(q^{-1})\tilde{I}_A(k) = q^{-1}B(q^{-1})u(k). \quad (13)$$

其中

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2},$$

$$B(q^{-1}) = K_N K_j (b_0 + b_1 q^{-1}),$$

$$b_0 = \left[\frac{1}{T_j} (1 - e^{-T/T_j}) - \frac{1}{T_N} (1 - e^{-T/T_N}) \right] / \left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_N} \right),$$

$$b_1 = \left[\frac{1}{T_N} (1 - e^{-T/T_j}) e^{-T/T_N} - \frac{1}{T_j} (1 - e^{-T/T_N}) e^{-T/T_j} \right] / \left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_N} \right),$$

$$a_1 = - (e^{-T/T_j} + e^{-T/T_N}), \quad a_2 = e^{-T \left(\frac{1}{T_j} + \frac{1}{T_N} \right)}.$$

控制器传递函数为

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{U(s)}{\tilde{I}_{pd}(s) - \tilde{I}_A(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right),$$

则 PID 控制器差分方程为

$$Q(q^{-1})u(k) = P(q^{-1})e(k) = P(q^{-1})(\tilde{I}_{pd}(k) - \tilde{I}_A(k)). \quad (14)$$

其中

$$P(q^{-1}) = p_0 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2}, \quad Q(q^{-1}) = 1 - q^{-1},$$

$$p_0 = K_P \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right), \quad p_1 = -K_P - 2p_2, \quad p_2 = \frac{K_P T_D}{T}.$$

PID 控制器参数 $P = [p_0 \ p_1 \ p_2]^T$, 可通过极小化下列目标函数

$$J = \sum_{k=0}^N [e^2(k) + r \Delta u^2(k)], \quad (15)$$

即由 $\frac{\partial J}{\partial P} = 0$ 而求得. 其中 $0 \leq r \leq 1$, 本系统 $r = 0.5$. $e(k)$, $\Delta u(k)$ 是根据具有外部激励的差分方程得到的, $k = 0, 1, 2, \dots, N$. 即由式(14)代入式(13), 化简后得

$$\begin{cases} e(k) = \frac{AQ}{AQ + q^{-1}BP} \tilde{I}_{pd}(k), \\ \Delta u(k) = \frac{(1 - q^{-1})AP}{AQ + q^{-1}BP} \tilde{I}_{pd}(k). \end{cases} \quad (16)$$

K_j 为已得到的辨识估计值, 则 B 应为

$$\hat{B}(q^{-1}) = K_N \hat{K}_j (b_0 + b_1 q^{-1}).$$

即

$$\begin{cases} e(k) = \frac{AQ}{AQ + q^{-1}\hat{B}P} \tilde{I}_{pd}(k), \\ \Delta u(k) = \frac{(1 - q^{-1})AP}{AQ + q^{-1}\hat{B}P} \tilde{I}_{pd}(k). \end{cases} \quad (17)$$

$\tilde{I}_{pd}$ 取为阶跃信号.

则计算机实现的自校正 PID 控制器算法为:

a) 利用一次完成最小二乘法估计得初值.

b) 读取 $\hat{I}_d(k)$ 和 $\hat{I}_a(k)$.

c) 用参数估计器求得过程未知参数估计值 $\hat{K}_j$, 进而求得 $\hat{B}$.

d) 由式(17)求出 $e(k)$, $\Delta u(k)$.

e) 由式(15)求 J , 极小化 J 求控制器参数 P .

f) 由式(14)实现 $u(k) = u(k-1) + (p_0 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2})e(k)$.

g) 返回 b).

4 计算机控制系统的实现

系统的实现包括系统硬件和软件两大部分^[5]. 硬件系统总体结构设计成适于工业控制应用的 STD 总线形式结构, 见图 4. 光电隔离开关量输出板用于控制直流电动机正反转, 以及微机系统与原模拟量控制系统的切换.

软件系统的设计, 包括实时监控程序、实时控制程序 (5ms 中断和 40ms 中断服务程序) 和子程序库的设计. 5ms 中断服务程序用于速度内环控制, 40ms 中断服务程序用于交流电机负载电流外环参数 K_j 的辨识估计及自校正控制, 简化框图如图 5 所示. 各子程序的调用、中断管理以查询标志方式进行.

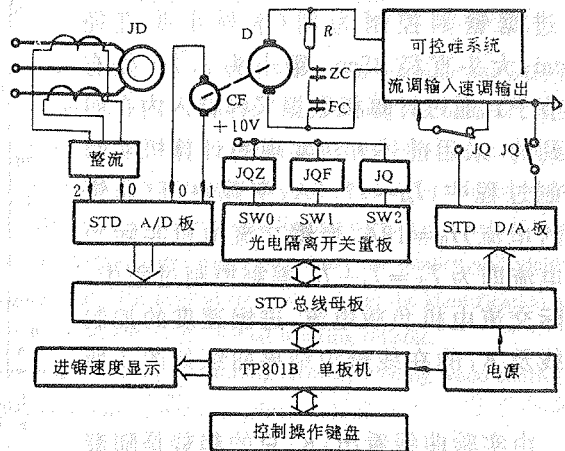


图 4 计算机硬件系统总体结构图

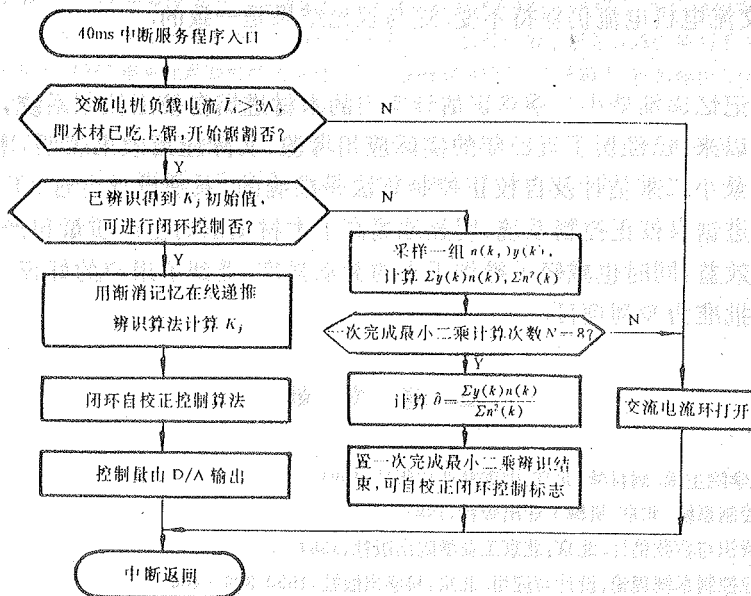


图 5 40ms 中断服务程序简化框图

5 现场应用试验

现场应用试验是 1990 年 6 月在新林林业局木材综合利用加工厂制材车间进行的. 拖动跑车的直流电机型号为 Z2-52 型, 额定转速 1500 转/分; 带锯交流电机型号为 YXS200L-4, 额定电流 35.9A, 功率 30kW.

速度闭环的实现比较简单, 这里就不再多述, 请参见文献[6]. 下面主要就交流电机负载电流闭环自校正控制实验作一简单介绍.

实验数据是用一根 4m 长的原木以小头进锯锯割控制为例(木材小头直径 22cm, 大头直径 35cm, 距小头 1.2m 处有一节子), 通过计算机数据采样存入内存而得到的. 采用前述方法实现的计算机实时控制过程中, $\bar{I}_{gd}=17.9\text{A}$, 空载电流(非锯木时电流) $\bar{I}_0=18\text{A}$, 带锯交流电机实际负载电流即为 $\bar{I}_{\text{实}}=\bar{I}_d+\bar{I}_0$, 锯割控制过程中, 实际交流电机负载电流, 进锯速度的控制曲线及 K_f 的在线辨识结果曲线如图 6 所示.

由实验曲线看出, K_f 总的趋势是随着木材直径变大(着距面大)而变大; 带锯交流电机负载电流基本恒定在设定值附近, 而进速度由于木材直径变粗而随动调节, 总的趋势为降低, 以保证带锯负载电流恒定. 当木材锯割至 1.2m 处遇到节子时, K_f 增大, 进锯速度降低, 而交流电机电流仍保持不变. 这与理论结果是一致的.

6 结束语

利用渐消记忆递推最小二乘辨识估计实现的木材进锯自校正控制系统, 自 1990 年投入到现场应用以来, 已经历了近三年的实际应用考验, 实际应用效果表明: 本文所设计的渐消记忆递推最小二乘估计及自校正控制算法是准确的, 系统设计合理, 工作可靠. 由于采用了该木材进锯自校正控制系统, 明显地提高了木材锯割的生产质量和产量, 提高了制材生产的经济效益, 同时也减轻了操作工人的劳动强度, 受到了用户的好评, 并于 1990 年被国家专利局批准为专利项目.

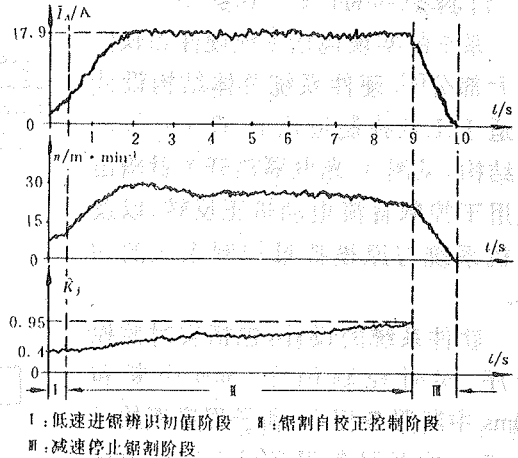


图 6 交流电机电流、进锯速度及 K_f 的在线辨识曲线

参 考 文 献

- [1] 南京林产工业学院主编. 制材学. 北京: 中国林业出版社, 1981
- [2] 陈伯时. 自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [3] 蔡季冰. 系统辨识与参数估计. 北京: 北京工业学院出版社, 1984
- [4] 李清泉. 自适应控制系统理论、设计与应用. 北京: 科学出版社, 1990, 389—400
- [5] Wang Hongrui, Fang Yiming, et al. A Microcomputer Based Sawing Wood Automatic Control System. 11 th IFAC World Congress, 1990, 3363
- [6] 宋维公, 王洪瑞, 方一鸣. 一种参数闭环辨识方法在裁木系统中的应用. 东北重型机械学院学报, 1989, 13(4): 1—9

[7] 夏德铃. 自动控制理论. 北京: 机械工业出版社, 1990

The Feeding Wood Self-Tuning Control in Gig Saw System Realized by Recursive Identification with Gradual Reducing Memory

FANG Yiming, WANG Hongrui, YANG Jingming and JIAO Xiaohong

(Department of Automation, Yanshan University • Qinghuangdao, 066004, PRC)

Abstract: In accordance with the character of the plant parameter varying with wood diameter and hardness etc in the sawing wood process, an identification and self-tuning control algorithm is presented in this paper, which suitable for the automatic control feeding wood in gig saw. In this method, first, the initial plant parameter is identified with the stage of feeding wood in constant low speed, on the base, the closed-loop self-tuning control is realized by recursive algorithm with gradual reducing memory, it guarantees that loading current of the A. C motor driving gig saw is the permitting maximum current of the technological condition, thus, the quality and yield of wood sawing are guaranteed, the economic gains are increased. The applied result shows that the identification and self-tuning control algorithm is correct, the system design reasonable, the actual working reliable.

Key words: recursive algorithm with gradual reducing memory; self-tuning control; feeding wood control in gig saw system; loading current of the A. C motor driving gig saw; microcomputer realization

本文作者简介

方一鸣 1965年生. 1988年东北重型机械学院自动化专业研究生毕业, 工学硕士. 现为燕山大学自动控制系讲师. 主要从事自适应控制及神经网络在机器人控制、轧机板形板厚控制中的应用研究.

王洪瑞 1956年生. 1981年东北重型机械学院自动化专业研究生毕业, 工学硕士. 现为燕山大学自动化所副所长, 副教授. 主要研究方向是鲁棒控制, 神经网络控制及在机器人控制、轧机板形板厚计算机控制系统中的应用.

杨景明 1958年生. 1987年东北重型机械学院自动化专业研究生毕业, 工学硕士. 现为燕山大学自动控制系副教授, 在职博士生. 主要从事自适应控制, 轧机板形板厚控制的应用研究.

焦晓红 女. 1966年生. 1991年东北重型机械学院自动化专业研究生毕业, 工学硕士. 现在燕山大学自动控制系从事教学和科研工作. 主要研究方向是鲁棒控制, 自适应控制和神经网络理论及应用.