

多线切割机速度同步系统的自适应逆控制

张义兵^{1,2}, 戴瑜兴¹, 汤 睿¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 分析了多线切割机放线系统张力锤的速度调节和张力控制的机械结构原理; 针对高速运行时数字PID控制系统存在的问题, 提出了一种自适应逆随动控制系统结构, 该系统以主电机为参考模型, 是由一个系统辨识环节和一个自适应控制器环节构成, 引入虚拟模型自适应地调整控制器, 使放线电机与主电机具有类似的动态特性; 样机的实验结果证明了该系统的可行性; 对跟随误差进行了全面的分析并提出了提高控制精度的方法。

关键词: 多线切割机; 自适应逆控制; 系统辨识; 伺服控制

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Adaptive inverse control of speed synchronization system for a multi-wire saw

ZHANG Yi-bing^{1,2}, DAI Yu-xing¹, TANG Rui¹

(1. College of Electric and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 411105, China;

2. College of Information Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

Abstract: This paper analyzes the mechanical structure-principle of the speed and tension control for the tension hamper in a multi-wire saw. To improve the existing control performance of the PID controller, we propose an adaptive inverse control algorithm which takes the main motor as the reference model and consists of a system identification process and an adaptive controller process. When the multi-wire saw is in operation, the controller adaptively adjusts the speed of the supplying motor to track the output speed of the main motor. The experiment results validate the system feasibility. Analysis of the tracking error is given in-depth, and the measures for its reduction are also proposed.

Key words: multi-wire saw; adaptive inverse control; system identification; servo control

1 引言(Introduction)

多丝切割是一种通过金属丝的高速往复运动把磨料带入半导体加工区域进行研磨, 最终把半导体切割成片薄片的一种新型加工方法; 多丝切割机已逐渐取代了传统的内圆切割成为半导体切割加工的主要方式. 多丝切割机中, 切割线走线系统是其核心部分. 切割线在走线过程中抖动幅度和频度直接决定了线切割加工的质量(切割面的平行度、切痕的最小宽度等). 多线切割机放线侧机械结构等效示意图如图1所示(收线侧结构与此类似), 在放线轮和主动轮之间加一个可以在垂直的滑槽内上下自由滑动的张力锤, 其作用体现在如下两个方面:

1) 速度调节.

设主电机、放线电机的输出线速度分别为 v_{1f} , v_{2f} , 以图1所标方向为正方向, 在忽略钢丝线自身弹

性伸缩的情况下, 重力摆锤的速度 v_G 为

$$v_G = (v_{1f} - v_{2f})/2. \quad (1)$$

2) 施加张力.

实践证明, 当切割线在切割加工过程中若始终保持某一恰当的恒定张力, 可以有效控制切割线抖动; 设 T 为切割线张力, f 为摩擦力, 重力锤的动力学方程如式(2)所示:

$$2T - mg = m \frac{dv_G}{dt} + f. \quad (2)$$

摩擦力 f 与张力锤的重量相比可以忽略不计; 当跟随效果较好时, v_G 趋向于0, 此时重力锤加速度也将很小, T 将保持恒定; 当跟随效果较差时, 式(2)中的加速度项将大幅增加, 张力将随之波动, 从而导致切割线抖动加剧. 所以抖动控制的实质是速度同步控制问题.

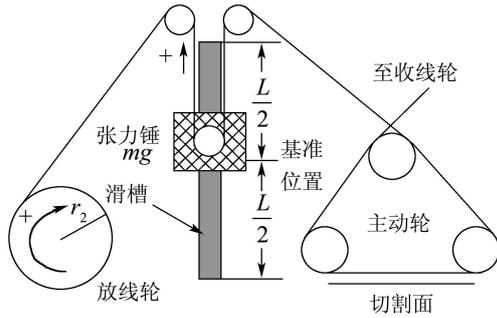


图1 多线切割机放线系统机械结构等效示意图
Fig. 1 Equivalent sketch map of multi-wire saw wire supplying mechanical system

2 控制系统设计分析(Analysis of speed synchronization control system)

在多线切割机中,主电机的速度是由程序设定,本系统中放线电机是一个随动跟踪控制系统,设伺服电机线速度控制系统的数学模型为

$$P(s) = \frac{k}{Ts + 1} \quad (3)$$

线切割机处于工作状态时,放线轮的半径会逐渐变小,主动轮的半径由于损耗也会变小.在放线过程中电机自身参数会发生变化:由于转动惯量的变小(大)会引起的电机固有加速时间变小(大)、半径变化导致的电机线速度与角速度之间关系的变更,对应式(1)数学模型中参数 k, T 的变化.所以对放线电机的控制是一个非线性、时变的随动系统控制问题^[1~4];基于上述分析,针对多线切割机放线电机控制要求解决以下问题:

- 1) 如何设计控制器,使得当主动轮和放线轮的直径、转动惯量某一小的领域内的变化时,控制系统的性能对上述变化不敏感;
- 2) 放线轮机械参数发生大范围变化时,控制器如何自适应地改变,以保证控制系统的性能.

根据系统的要求,控制器中需要具备较强鲁棒性、自适应性^[5].本系统的多线切割机采用往复走线方式,采用数字PID控制器时,在速度恒定的情况下控制性能满足控制要求,但处于加减速阶段时,由于放线电机随动系统的输出与主电机的输出之间有1个采样时间的延时且电机自身参数的变化,加减速期间的总会有一定的跟随误差.对于机械参数变化不大且运行速度低(最高走线速度约240 m/min)的小型切割机(如湖南宇晶公司的XQ120),PID控制能基本满足控制要求.对于高速度、机械参数变化大的大型多线切割机(如湖南宇晶公司的XQ300A系列,最高走线速度约(600 m/min)),这种简单的数字PID控制将不能保证控制系统运行的可靠性,所以必须采用先进的控制策略.

3 基于虚拟对象的自适应逆控制系统设计(Design of adaptive inverse system based on virtual object)

3.1 自适应逆控制系统设计(Design of adaptive inverse system)

为了解决主电机与收线电机的输出之间的1个采样时间的延时问题及速度正反向过渡阶段跟踪误差过大问题,采用图2所示的控制结构.设计时以主电机为模型参考,运用自适应算法调节控制器 $C(z^{-1})$,使被控对象与控制器级联后构成的等效系统的与参考模型(即主电机)具有类似的动态特性和静态特性^[6],即理想情况下满足

$$C(z^{-1}) = P_1(z^{-1})P_2^{-1}(z^{-1}). \quad (4)$$

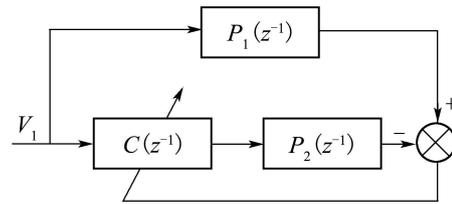


图2 多放线电机自适应逆控制
Fig. 2 Adaptive inverse control of wire-supplying motor

上式中 $P_1(z^{-1}), P_2(z^{-1})$ 分别对应主电机和放线电机的数字化数学模型,等效于1个零阶保持器、1个伺服电机和1个线速度测量装置(增量性光电编码器)的级联.在切割机中速度信号正负交替的次数一般为6~10次,过渡时间为1秒左右,对速度信号进行简单的分析就可以看出,速度信号的能量集中在0.2 Hz以下,一般的运动控制器的采样频率都在500 Hz以上,根据信号处理理论,两者能较好地逼近实际电机.式(3)的极点在 s 左边平面,所以 $P_1(z^{-1}), P_2(z^{-1}), C(z^{-1})$ 都是最小相系统,可以利用长除法对其展开:

$$C(z^{-1}) = \frac{P_1(z^{-1})}{P_2(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} \div \frac{b_2 z^{-1}}{1 - a_2 z^{-1}} = K \frac{1 - a_2 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} = K(1 + (a_1 - a_2)z^{-1} + a_1(a_1 - a_2)z^{-2} + \dots + a_1^{n-1}(a_1 - a_2)z^{-n} + \dots) \quad (5)$$

上式中 $K = b_1/b_2, w_0 = K, w_i = a_1^{i-1}(a_1 - a_2)z^{-i}, i = 1, 2, 3, \dots$.

$C(z^{-1})$ 是一个无限长的梳状数字滤波器,多线切割机采用的都是机械刚性很大的伺服电机,式(3)中的 T 值很小,对于最小相系统其数字化模型中 a_1, a_2 都小于1,随着 i 的增加, w_i 会迅速递减,所以 $C(z^{-1})$ 可以用FIR滤波器有效逼近.从式(5)还可以看出:当主电机与放线电机机械特性接近

时, a_1, a_2 的值接近, 可以用较小阶数的FIR来逼近 $C(z^{-1})$.

图2中所用的误差是针对放线电机输出的误差, 而不是针对自适应控制器的输出的, 所以不能采用LMS算法或RLS算法; 为了能保证自适应控制器系数的迭代算法的顺利实现, 对其进行如下改进:

1) 对放线电机进行动态系统辨识, 放线电机的数学模型也是最小相系统, 与控制器类似, 可以用1个自适应FIR滤波器 $\hat{P}_2(z^{-1})$ 逼近 $P_2(z^{-1})$.

$$\hat{P}_2(z^{-1}) = h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_M z^{-M}. \quad (6)$$

2) 将通过模式识别所得的 $\hat{P}_2(z^{-1})$ 作为虚拟的对象, 应用到图2所示的控制结构中, 将控制器的位置调整到输出端, 改进后的控制结构见图3.

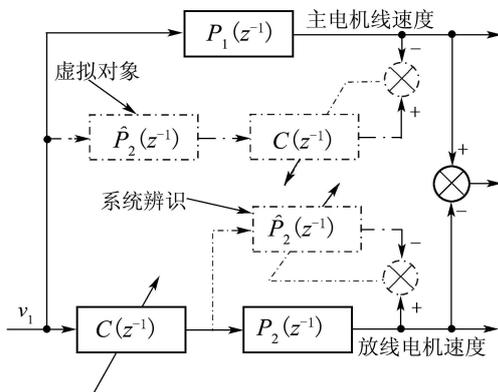


图3 基于虚拟对象的自适应逆控制

Fig. 3 Adaptive inverse control based on virtual object

分析基于虚拟对象的自适应逆的控制结构, 在理想情况下对于系统辨识环节有

$$\hat{P}_2(z^{-1}) = P_2(z^{-1}). \quad (7)$$

对于虚拟对象环节有

$$\hat{P}_2(z^{-1})C(z^{-1}) = P_1(z^{-1}). \quad (8)$$

结合式(7)(8)可以得出式(4)的结论.

与图2所示结构相比, 图3的控制结构加入了虚线中的系统辨识环节、虚拟对象环节, 这样做的优点是 $C(z^{-1}), \hat{P}_2(z^{-1})$ 都处于输出端位置, 可以灵活选用LMS算法或RLS算法对自适应滤波器的系数进行调整.

3.2 系统辨识和自适应控制器的LMS算法(System identification and LMS algorithm of adaptive controller)

对被控对象进行模式识别, 从而使得控制结构由图2转化为图3所示的易于LMS算法或RLS算法的结构, 采用自适应LMS算法, 以瞬时值代替数学期望, 系数更新迭代运算分3步:

第1步 求自适应FIR滤波器输出, 设 $W(n)$ 为FIR滤波器 n 时刻系数列向量, $X(n)$ 为FIR滤波器 n 时刻由输入及输入延时所得的列向量, 输出 $y(n)$ 为

$$y(n) = W^T(n)X(n). \quad (9)$$

第2步 计算跟随误差, 设是自适应FIR滤波器参考模型的输出为 $d(n)$, 跟踪误差为 $e(n)$,

$$y(n) = W^T(n)X(n). \quad (10)$$

第3步 自适应滤波器系数更新迭代公式为

$$W(n+1) = W(n) - \alpha \frac{\partial}{\partial W(n)} E(e^2(n)) = W(n) + \alpha e(n)X(n). \quad (11)$$

3.3 张力锤的位置控制(Position control of hamper)

为了保证张力锤的速度调控功能, 图1中的张力锤在稳态时应处于中心位置, 即实际的系统中也需要对的位置误差(即张力锤的速度的积分)进行控制, 注意到切割机在实际运行时其机械参数变更的速度要远小于自适应控制器系数调整的速度, 所以只需在指令速度曲线的1个周期内的某个较小时间段内进行自适应调整, 而在其他时间段内使控制器参数保持不变并在放线电机的指令信号中叠加1个张力锤位置反馈分量即可实现张力锤的位置控制.

4 实验结果(Experiment results)

4.1 实验样机的主要设备和参数(Main equipment and parameter of sample machine)

主控制器选用日本安川的采用最新的MP2000系列运动控制器, 主电机和放线电机均采用安川公司高端的 Σ III 系列伺服电机和伺服驱动器, 张力传感器采用北京正开的MCK-T6, 张力锤的重量为4kg, 记录时间为7.936s(MP2000的内存所限), 主电机的运行速度为500m/min米/分钟, 切割线的直径为0.16mm, 由于采用数字PID控制不能在此速度下运行(跟踪误差过大, 导致断线), 所以没有PID对比实验.

4.2 样机测试结果(Experiment of sample machine)

由式(1)(2)结合机械结构图可以看出, 张力锤的位置反映的是跟随系统的调节能力, 张力锤的速度反映的是跟随系统的跟随误差, 切割线上的张力反映的是张力锤的加速度. 所以, 为了衡量系统的控制性能, 利用运动控制器开发工具MP720观察走线速度、张力锤的位置、速度及切割线上的张力, 并将观察数据导入至Excel文档保存, 根据XQ300A样机的观测数据用MATLAB分别绘制各参量的波形, 实验

结果如图4所示。

从图中可以看出,在加减速阶段,张力锤有微小的位置移动,移动的范围在2 mm之内,速度、切割线上的张力相对稳态而言变化幅度更大,但绝对幅度较小,张力传感器的数据显示切割线上的张力变化范围为1.8 kgf~2.2 kgf之间,切割线上的张力力控制效果好,由此可以看出:速度同步控制系统的控制精度较高。

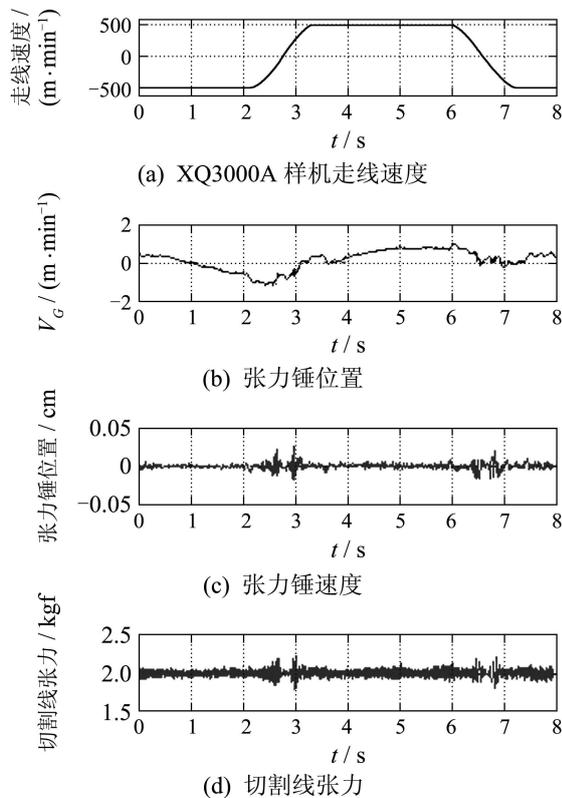


图4 XQ300A多线切割机实验结果

Fig. 4 Experiment results of XQ300A machine

4.3 跟随误差分析及改进方案(Analysis and improvement of Following error)

基于理论分析及实验结果可以看出,速度同步控制的跟随误差主要有以下来源:

- 1) 伺服电机的扰动及外界干扰;
- 2) 自适应控制器和模型的FIR滤波器表示,实际的电机模型脉冲响应是无限长的,用有限长的FIR滤波器逼近模型或模型的逆必然存在一定的误差;
- 3) 运算精度,在采样过程中、运算过程中,数据的字长是固定的,必然带来量化误差和运算误差;
- 4) 当指令信号中出现高频分量如电机正反向过渡阶段时,有一定的跟随误差;
- 5) 在切割机运行起始阶段,由于自适应算法所需的寄存器中的数据都初始化为零,且控制器参数是未经学习得到,所以在起始学习阶段内跟踪误差较大。

针对上述误差分析, XQ300A多线切割机中综合改进的方法是:通过在放线电机的指令信号中加入噪声补偿分量来抵消扰动和干扰;增加自适应FIR滤波器的长度以提高系统辨识环节的逼近效果;运用浮点运算来代替定点运算来提高运算精度;减小走线系统换向阶段的误差的方法是:设计一移动平均滤波器作为前置滤波器,将指令信号中的高频分量去掉,使速度过渡波形由直线型平滑成为“S”型,并且硬件选型时选用高动态响应速度伺服电机;在切割机开机运行时设置低指令速度,这样即使速度跟随的相对误差大,但绝对误差仍较小。

5 结论(Conclusion)

多线切割机速度同步的自适应逆控制系统具有以下特点:

- 1) 以实际的电机作为参考模型,通过控制算法使随动电机的输出逼近主电机的输出;
- 2) 虽然形式上是开环控制,但控制精度高。速度指令是同时输入而不是以主电机的反馈速度作为放线电机的指令输入,从根本上消除了由采样延时造成的跟随误差;
- 3) 自适应性强;控制器是一个校正装置,能改变控制输入信号的增益、带宽,自适应控制器会自动根据指令信号的变化实时调整控制器的频率特性,而传统的固定参数数字PID控制器的频率特性是始终不变的,不会因指令信号的变化而改变;
- 4) 引入虚拟对象;为了能运用LMS算法或RLS算法,对被控制对象进行模式识别,并以此作为虚拟对象与虚拟的自适应控制器交换位置,将自适应控制器调整到输出端。

作者采用自适应逆控制,在湖南宇晶机器有限公司成功设计了XQ300A样机的速度同步系统,经专家鉴定,该产品的多电机速度同步控制技术居于国际领先水平。本文的研究成果不仅可应用于多线切割机领域,还可用于绕卷机、纺织机、无轴印刷机等无齿轮传动速度同步控制领域,具有一定的理论意义与参考价值。

参考文献(References):

- [1] 张承进, 元学广. 一般严格反馈型非线性系统的自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 621-626.
(ZHANG Chengjin, QI Xueguang. Adapt control of general nonlinear systems in strict feedback form[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 621-626.)
- [2] SHUZHONG Sam Ge, WANG J. Robust adaptive tracking for time-varying uncertain nonlinear systems with unknown control coefficients[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(8): 1436-1469.

统满足相同初始条件的假设, 当快速路初始交通流速度随迭代次数随机变化时, 可实现快速路上的交通流密度的几乎完全跟踪性能. 仿真结果进一步验证了NP-AILC的有效性.

参考文献(References):

- [1] ISAKEN L, PAYNE H J. Suboptimal control of linear systems by augmentation with application to freeway traffic regulation[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1973, 18(3): 210 – 219.
- [2] GOLSTEIN N, KUMAR K S P. A decentralized control strategy for freeway regulation[J]. *Transportation Research B*, 1982, 16B(4): 279 – 290.
- [3] SUN M, WANG D. Initial shift issues on discrete-time iterative learning control with system relative degree[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(1): 144 – 148.
- [4] CHI R H, HOU Z S. Dual-stage optimal iterative learning control for nonlinear non-affine discrete-time systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(10): 1061 – 1065.
- [5] HOU Z, XU J X. Freeway traffic density control using iterative learning control approach[C]// *Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Shanghai: [s.n.], 2003, 2: 1081 – 1086.
- [6] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
(HOU Zhongsheng. *Nonparametric Model and Its Adaptive Control Theory*[M]. Beijing: Science Press, 1999.)
- [7] PAPAGEORGIU M, BLOSSEVILLE J M, HADJ-SALEM H. Modeling and real time control on traffic flow on the southern part of Bpulevard Peripherique in Paris. Part I: Modeling; Part II: Coordinated on-ramp metering[J]. *Transportation Research*, 1990, A24(9): 345 – 370.

作者简介:

池荣虎 (1975—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为自适应控制、学习控制、智能交通、深空探测与自主导航等, E-mail: rhchi@163.com;

侯忠生 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为自适应控制、学习控制、交通信号控制等, E-mail: houzhongsheng@china.com;

隋树林 (1958—), 男, 教授, 研究方向为深空探测、自主导航等, E-mail: shulin_sui@hotmail.com.

(上接第1010页)

- [3] 吴玉香, 王灏, 毛宗源. 机器人轨迹跟踪的间接自适应模糊控制[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(5): 748 – 756.
(WU Yuxiang, WANG Hao, MAO Zongyuan. Fuzzy indirect adaptive controller for manipulator trajectory tracking applications[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(5): 748 – 756.)
- [4] 王宝华, 杨成梧, 张强. 发电机的非线性自适应逆推综合控制[J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(1): 60 – 64.
(WANG Baohua, YANG Chengwu, ZHANG Qiang. Integrated non-linear adaptive backstepping controller for synchronous generator[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 60 – 64.)
- [5] 夏超英. 直接转矩控制系统的稳定性问题和鲁棒控制器设计[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(6): 54 – 58.
(XIA Chaoying. Stability problem and robust controller design of direct torque control system[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 54 – 58.)
- [6] WIDROW B, WALACH E. *Adapt Inverse Control*[M]. Englewood Cliffs, American, NJ: Prentice – Hall, 1998.

作者简介:

张义兵 (1973—), 男, 湘潭大学讲师, 湖南大学博士研究生, 目前研究方向为运动控制、智能信号处理, E-mail: zhybing@sohu.com;

戴瑜兴 (1956—), 男, 湖南大学教授, 目前研究方向为数字化系统设计理论与应用、现代网络通信理论及应用, E-mail: daiyx@hnu.cn;

汤睿 (1980—), 男, 湖南大学博士研究生, 主要研究方向为数字化系统设计理论与应用、信息融合技术.