

DOI: 10.3901/JME.2011.05.183

多线切割机走线系统的张力控制*

蒋 近^{1,2} 戴瑜兴¹ 郜克存¹ 彭思齐¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082;

2. 湘潭大学信息工程学院 湘潭 411105)

摘要: 随着集成电路和光伏产业的飞速发展,硅材料加工技术越来越受到重视,其中切割是硅材料加工的一道关键工序。介绍多线切割机走线系统的总体结构,说明它的工作原理,建立放线系统张力控制结构的运动学方程,分析产生张力波动的原因,提出相应的解决方法。设计张力控制系统的硬件平台,通过多电动机同步控制进行间接张力控制,提出一种基于相邻轴误差的多电动机同步控制方法,定义多电动机系统的跟踪误差和同步误差,引入相邻轴误差的概念,构造积分滑模面,设计控制转矩,保证多电动机的同步运动,减小张力的波动,保证钢丝线的张力稳定。试验结果表明所提出的张力控制方法十分有效,该张力控制系统具有张力波动范围小、控制精度高、调整方便的优点。

关键词: 多线切割机 走线系统 张力控制 多电动机同步控制

中图分类号: TP23

Tension Control of Wire-traveling System for Multi-wire Saw

JIANG Jin^{1,2} DAI Yuxing¹ GAO Kecun¹ PENG Siqi¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082;

2. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

Abstract: With rapid development of integrate circuit and photovoltaic industry, silicon material processing technology is becoming more and more appreciated. Especially slicing is a key procedure in silicon material processing. Overall structure of wire-traveling system for multi-wire saw is introduced and its working principle is explained. The kinematics equation of tension control structure for pay-off system is established. The reasons for tension fluctuation are analyzed, and corresponding solution is proposed. After a hardware platform of tension control system is built, indirect tension control is carried out through multi-motor synchronization control. A multi-motor synchronization control method is proposed on the basis of adjacent axis error through definition of tracking error and synchronization error. The integral sliding mode surface is defined for designing control torque, and multi-motor synchronization motion is guaranteed, tension fluctuation is reduced and tension stability is ensured. Experimental results show that the proposed tension control method is very effective. This tension control system has the merits of small tension fluctuation range, high-precision control and convenient adjustment.

Key words: Multi-wire saw Wire running system Tension control Multi-motor synchronization control

0 前言

随着集成电路和光伏产业的飞速发展,对硅片直径的增大,以及对几何尺寸的更高要求和硅片表面机械损伤层等要求,对传统的硅片加工方法提出了挑战。多线切割是通过一根钢丝线的高速往复运动把磨料带入加工区域进行研磨,将待切割硅棒一次性同时切割成数百或数千片薄片的新方法。例如瑞士 Meyer Burger 公司的 DS262 型多线切割机,

它具有同时切割 4 根硅棒的功能,一组切片数最高可达 4 400 片,这相当于 50 台切片机一天的工作量。多线切割机以其极高的生产效率和出片率,逐渐取代内圆和外圆等传统方式,所切硅片具有翘曲度小、平行度好和中心厚度误差小等优点^[1-3]。

多线切割机走线系统的张力控制是关系到加工质量好坏的关键技术。为了减少硅材料的损耗,多线切割一般使用很细的钢丝线(直径 0.12~0.16 mm),如果加工过程中钢丝线的张力过大,会使钢丝线崩断,造成整个加工中断,那么昂贵的硅棒将报废;而张力过小则会引起钢丝线的低频振动,影响到硅片的生产过程,使得加工出来的硅片质量较差^[4-6]。文献[7]中采用伺服电动机代替重锤施加张

* 国家发改委(发改投资[2009]1168号)、国家科技重大专项(2009ZX02011-002)和湖南省重点科技计划(2009CK2005)资助项目。
20100310 收到初稿,20101021 收到修改稿

力,分析采用伺服电动机施加张力的优点;文献[8]中通过张力传感器测量线张力,采用伺服电动机的位置控制来改变张力大小;文献[9]中采用神经网络逆控制实现两电动机系统的速度和张力的解耦控制。本文提出一种基于相邻轴误差的多电动机同步控制方法进行间接张力控制,成功开发了多线切割机的张力控制系统,样机试验结果验证了该方法的正确性。

1 多线切割机走线系统的总体结构

多线切割机走线系统的总体结构如图 1 所示。开始所有钢丝线全部缠绕在放线轮 12 上,通过一系列导向轮缠绕到两个加工辊(5 和 8)上,形成一排数百或数千的按一定间隔排列的钢丝线,它们就组成了切割面,再通过一系列导向轮将钢丝线缠绕到收线轮 1 上,两个加工辊通过同步带轮由一个主电动机拖动,加工过程中使得两个加工辊正反向交替运转,同时通过一个放线电动机、一个收线电动机、两个张力电动机、两个排线电动机和一个工作台电动机的协调运动,使钢丝线逐渐由放线轮转移到收线轮上,同时将放置硅棒的工作台 7 从上往下移动,完成硅棒 6 的切片加工,一次性将硅棒切割成数百或者数千片薄片,每片厚度仅 0.18 mm 左右。

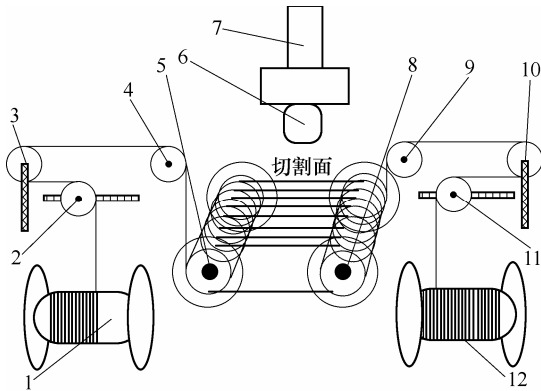


图 1 多线切割机走线系统的总体结构

1. 收线轮 2, 11. 排线轮 3, 10. 张力轮 4, 9. 导向轮
5, 8. 加工辊 6. 硅棒 7. 工作台 12. 放线轮

2 张力波动的原因

多线切割机走线系统的张力控制是多线切割机的关键技术,下面以图 1 中放线侧的张力轮 10 为例说明张力波动的原因,张力控制的结构如图 2 所示。

由图 2 可得

$$v = \omega L = \frac{(v_1 - v_2)}{2} \quad (1)$$

式中 v —— 张力摆杆的线速度
 ω —— 张力摆杆的角速度
 L —— 张力摆杆的长度
 v_1 —— 加工辊侧的线速度
 v_2 —— 放线侧的线速度

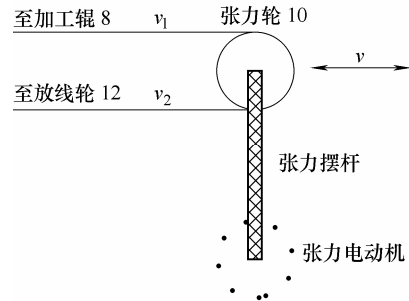


图 2 张力控制的结构

忽略摩擦力,张力摆杆的运动学方程为

$$2FL - M = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{J}{L} \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

式中 F —— 钢丝线的张力
 M —— 张力电动机的输出转矩
 J —— 张力电动机的转动惯量
由式(2)变形可得

$$F = \frac{M}{2L} + \frac{J}{2L^2} \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

联合式(1)、(3)分析可知,张力 F 的波动是由式(3)第二项的波动所引起的,它包括以下两部分。

(1) $J/2L^2$: 在满足力学性能的情况下选择较小的 J 和较大的 L 可以使得这部分的值下降,达到减小张力波动的作用,确定之后不能再改变。

(2) dv/dt : 减小张力的波动就是控制张力摆杆两边的加工辊主电动机和放线电动机的线速度差的变化率,实际上就是加工辊主电动机和放线电动机的同步控制。

3 张力控制系统

3.1 张力控制系统的硬件设计

张力控制系统的硬件设计如图 3 所示,包括一个收线电动机、一个放线电动机、两个张力电动机、一个主电动机和一个运动控制器。运动控制器和伺服系统选用博世力士乐公司的产品。运动控制器通过 SERCOS 总线控制各个电动机的运动,对张力电动机实行转矩控制来施加张力,同时通过调整收放线电动机和主电动机的同步运动来间接控制张力。

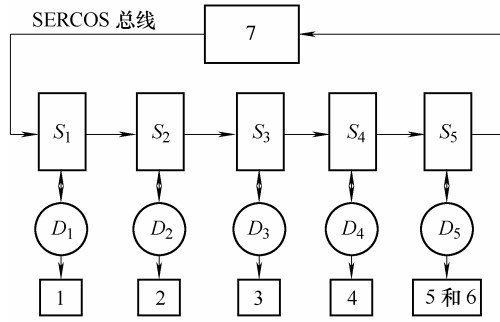


图3 张力控制系统的硬件设计

1. 收线轮 2. 放线轮 3,4. 张力轮 5,6. 加工辊 7. 控制器
 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 ——伺服驱动器 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 ——伺服电动机

3.2 基于相邻轴误差的多电动机同步控制方法

3.2.1 多电动机同步控制方法的提出

多电动机同步控制需要实现收线电动机、放线电动机和主电动机的同步运动^[10-11]。为便于分析,下文文中下标1表示收线电动机,下标2表示主电动机,下标3表示放线电动机。忽略外部干扰因素,电动机的运动方程定义如下

$$J_i \dot{\omega}_i(t) + C_i \omega_i(t) = M_i \quad i=1 \sim 3 \quad (4)$$

式中 $\omega_i(t)$ ——第*i*轴的角速度

J_i ——第*i*轴的转动惯量

C_i ——第*i*轴的非线性系数

M_i ——第*i*轴的输入转矩

定义第*i*轴的线速度跟踪误差为

$$e_i(t) = r_i(\omega_i^d(t) - \omega_i(t)) \quad i=1 \sim 3 \quad (5)$$

式中 $\omega_i^d(t)$ ——第*i*轴的期望角速度

r_i ——第*i*轴的半径

定义相邻轴的线速度同步误差为

$$\begin{cases} \varepsilon_1(t) = e_1(t) - e_2(t) \\ \varepsilon_2(t) = e_2(t) - e_3(t) \\ \varepsilon_3(t) = e_3(t) - e_1(t) \end{cases} \quad (6)$$

基于上述定义,多电动机同步控制的目的是使跟踪误差 $e_i(t)$ 和同步误差 $\varepsilon_i(t)$ 趋于零。

3.2.2 多电动机同步控制方法的设计

对第*i*轴的控制不仅要控制轴本身的跟踪误差,而且还要控制第*i*-1和第*i*+1轴的同步运动,因此引入相邻轴误差 $e_i^*(t)$ 的概念,它包含跟踪误差 $e_i(t)$ 和同步误差 $\varepsilon_i(t)$,定义 $e_i^*(t)$ 为

$$\begin{cases} e_1^*(t) = e_1(t) + \alpha \int_0^t (\varepsilon_1(w) - \varepsilon_3(w)) dw \\ e_2^*(t) = e_2(t) + \alpha \int_0^t (\varepsilon_2(w) - \varepsilon_1(w)) dw \\ e_3^*(t) = e_3(t) + \alpha \int_0^t (\varepsilon_3(w) - \varepsilon_2(w)) dw \end{cases} \quad (7)$$

式中, α 是一个正的系数。

定义误差控制量

$$h_i(t) = \dot{e}_i^*(t) + \beta e_i^*(t) \quad i=1 \sim 3 \quad (8)$$

式中, β 是一个正的系数。

可以设计控制转矩 M_i 使得 $h_i(t)$ 位于滑模面上,则 $e_i^*(t)$ 和 $\dot{e}_i^*(t)$ 将趋于零,那么 $e_i(t)$ 和 $\varepsilon_i(t)$ 也将趋于零,达到多电动机同步的目的。

定义积分滑模面

$$S_i(t) = \int_0^t h_i(w) dw \quad i=1 \sim 3 \quad (9)$$

设计控制转矩 M_i 为

$$\begin{aligned} M_1 &= J_1 \dot{\omega}_1^d(t) + C_1 \omega_1(t) + \frac{J_1 \beta + C_1}{r_1} e_1^*(t) + \\ &\quad \frac{C_1 \beta}{r_1} \int_0^t e_1^*(w) dw + k_r h_1(t) + k_s (\varepsilon_1(t) - \varepsilon_3(t)) \\ M_2 &= J_2 \dot{\omega}_2^d(t) + C_2 \omega_2(t) + \frac{J_2 \beta + C_2}{r_2} e_2^*(t) + \\ &\quad \frac{C_2 \beta}{r_2} \int_0^t e_2^*(w) dw + k_r h_2(t) + k_s (\varepsilon_2(t) - \varepsilon_1(t)) \\ M_3 &= J_3 \dot{\omega}_3^d(t) + C_3 \omega_3(t) + \frac{J_3 \beta + C_3}{r_3} e_3^*(t) + \\ &\quad \frac{C_3 \beta}{r_3} \int_0^t e_3^*(w) dw + k_r h_3(t) + k_s (\varepsilon_3(t) - \varepsilon_2(t)) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, k_r 和 k_s 为正的系数。

第*i*轴的控制框图如图4所示。基于相邻轴误差的多电动机同步控制方法通过控制跟踪误差和同步误差趋于零,简化了多电动机之间的关系,实现了多电动机的同步运动。

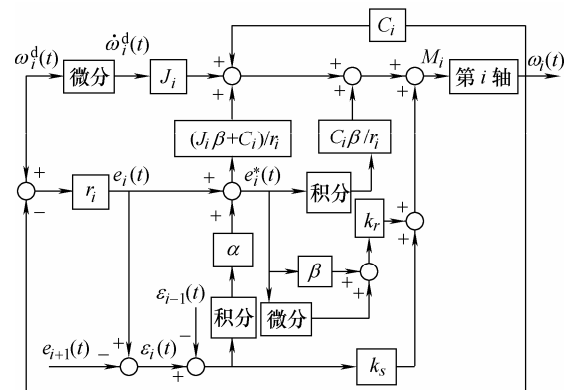


图4 第*i*轴的控制框图

4 试验

张力控制系统采用图2的结构(收、放线侧结构相同),控制系统选用博世力士乐公司的运动控制器和伺服系统,张力传感器选用FMS公司的RMGZ 121A.H14+EMGZ306A,钢丝线的直径为0.14 mm,

张力设定为 25 N, 走线速度设定为 300 m/min。为了进行对比, 其他条件都一样的情况下分别采用比例积分微分 (Proportional integral derivative, PID) 的张力控制和本文所提控制方法来实现多线切割机的运动。

经过反复试验, PID 控制器的参数取为 $K_p=0.7$, $T_I=0.13$, $T_D=0.001$; 本文所提控制方法的参数为 $\alpha=80$, $\beta=9$, $k_t=1$, $k_s=1$ 。

利用主控制器开发工具 IndraWorks Engineering 得到主电动机的速度、钢丝线的张力和张力摆杆的位置, 将采样数据导入到 Matlab 软件中, 试验结果如表 1、2 和图 5 所示。

表 1 钢丝线的张力值 N

方法	张力最大值 F_{\max}	张力最小值 F_{\min}
PID 的张力控制	26.16	24.10
本文所提控制方法	25.35	24.87

表 2 张力摆杆的位置偏移值 rad

方法	位置偏移最大值 P_{\max}	位置偏移最小值 P_{\min}
PID 的张力控制	0.087 8	-0.102 4
本文所提控制方法	0.031 2	-0.041 1

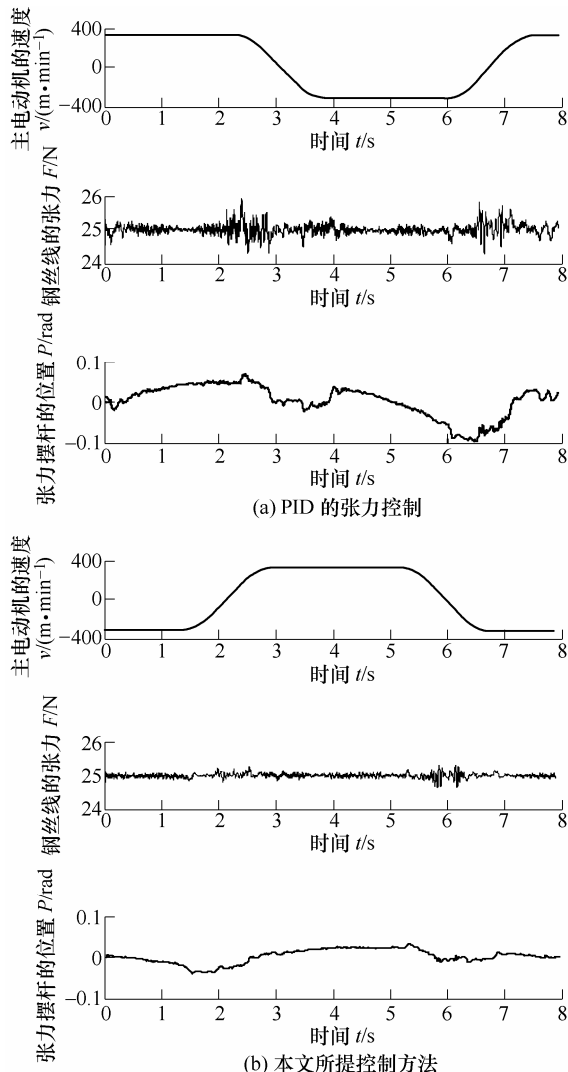


图 5 多线切割机运行的试验结果

从试验结果中可知, 使用 PID 的张力控制时, 在加减速阶段, 张力摆杆的位置移动范围在 ± 0.1 rad, 钢丝线张力的变化在 $25\text{N} \pm 1$ N, 恒速运行中张力的波动变化幅度比较大, 放线电动机和主电动机的同步性比较差。使用本文所提控制方法时, 在加减速阶段, 张力摆杆的位置移动范围在 ± 0.04 rad, 钢丝线张力的变化在 $25\text{N} \pm 0.5$ N, 恒速运行中张力的波动变化幅度很小, 放线电动机和主电动机的同步性比较好。

为了定量对比两种控制方法的结果, 下面来计算张力的静差率和波动率两个参数^[12]。

静差率 δ 是评价系统性能的一个重要指标, 其计算公式如下

$$\delta = \frac{2(F_{\max} - F_{\min})}{F_{\max} + F_{\min}} \times 100\% \quad (11)$$

式中 F_{\max} ——张力最大值

F_{\min} ——张力最小值

波动率 δ' 是评价系统性能的一个关键指标, 其计算公式如下

$$\delta' = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_t} \times 100\% \quad (12)$$

式中, F_t 为张力参考值。

由表 1 计算得: 使用 PID 的张力控制时, 静差率 $\delta=8.2\%$, 波动率 $\delta'=8.24\%$; 使用本文所提控制方法时, 静差率 $\delta=1.91\%$, 波动率 $\delta'=1.92\%$ 。

5 结论

(1) 通过张力电动机的转矩控制来施加张力, 调节张力大小比较方便。

(2) 建立了基于 SERCOS 总线的张力控制系统的硬件平台, 性能稳定, 抗干扰性强。

(3) 提出了基于相邻轴误差的多电动机同步控制方法, 主电动机和收放线电动机之间同步性好, 钢丝线张力波动小, 断线率低。

(4) 本文的研究成果也可以应用于纺织, 印刷和造纸等领域, 具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 邱明波, 黄因慧, 刘志东, 等. 太阳能硅片制造方法研究现状[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(8): 1017-1020. QIU Mingbo, HUANG Yin-hui, LIU Zhidong, et al. A review of the fabrication methods for solar silicon wafer[J]. Mechanical Science and Technology, 2008, 27(8): 1017-1020.
- [2] HSU C Y, CHEN C S, TSAO C C. Free abrasive wire

- saw machining of ceramics[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(5-6): 503-511.
- [3] MOLLER H J. Basic mechanisms and models of multi-wire sawing[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(7): 501-513.
- [4] JANABI-SHARIFI F. A neuro-fuzzy system for looper tension control in rolling mills[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(1): 1-13.
- [5] ZHONG Tianyu, WANG Qingfeng, LI Yanmin, et al. Electro-hydraulic compound control method and characteristic of control for tension system with high inertia loads[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(3): 391-395.
- [6] VALENZUELA M A, ROBERT D L. Electronic line-shafting control for paper machine drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 158-163.
- [7] 张义兵, 戴瑜兴, 袁巨龙, 等. 多线切割机线张力控制系统设计实现[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 295-300.
- ZHANG Yibin, DAI Yuxin, YUAN Julong, et al. Design and implement of wire tension control system for multi-wire saw[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 295-300.
- [8] 姜永成, 任福君. 基于多轴运动控制器的电极丝恒张力控制系统[J]. 中国机械工程, 2008, 19(16): 1920-1924.
- JIANG Yongcheng, REN Fujun. Constant tension control system of wire tool in WEDM-HS based on PMAC[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(16): 1920-1924.
- [9] WANG Deming, JU Ping, LIU Guohai. Decoupling control of two motors system based on neural network inverse system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(4): 602-605.
- [10] 孔德庆, 吴军, 李铁民, 等. 一种4自由度冗余并联机床的控制[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 152-157.
- KONG Deqing, WU Jun, LI Tiemin, et al. Control of a 4-DOF parallel kinematic machine with actuation redundancy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 152-157.
- [11] RENTON D, ELBESTAWI M A. High speed servo control of multi-axis machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(4): 539-559.
- [12] 何金保, 郭帅, 何永义, 等. 基于遗传优化的张力模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3): 243-248.
- HE Jinbao, GUO Shuai, HE Yongyi, et al. A fuzzy tension-controller based on genetic algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(3): 243-248.

作者简介: 蒋近, 男, 1979年出生, 博士研究生, 讲师。研究方向为智能控制、运动控制、智能信号处理。

E-mail: jiangjin007@163.com

戴瑜兴, 男, 1956年出生, 教授, 博士研究生导师。研究方向为数字化系统设计理论与应用、数控技术及装备信息化。

E-mail: daiyx@hnu.cn

邵克存, 男, 1981年出生, 博士研究生。研究方向为数字化系统设计理论与应用。

E-mail: kcgao@goma.cn

彭思齐, 男, 1978年出生, 博士研究生。研究方向为数控技术。

E-mail: sqpeng1@sina.com