

## LED 多线切割机同步控制系统研制

彭思齐<sup>1,2</sup> 戴瑜兴<sup>1</sup> 蒋 近<sup>1</sup>

1. 湖南大学,长沙,410082 2. 湘潭大学,湘潭,411105

**摘要:**同步控制是 LED 多线切割机控制系统成功的关键。分析了传统多线切割机切片过程的受力模型,针对其缺陷设计了一种加工罗拉摇摆装置,并给出其模糊迭代同步控制策略。与单一模糊控制方法相比,该策略充分考虑了机器改进后的结构特点和运行过程中的多种干扰,使用 PD 模糊控制器使系统迅速达到稳定状态并具有一定精度后,再利用迭代学习控制器消除 PD 模糊控制器的稳态误差。实验对比证明,该算法具有控制精度高、切片质量好的特点。

**关键词:**LED;多线切割机;摆动装置;模糊迭代控制;同步控制

**中图分类号:**TP273

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.002

## Development of Synchronous Control System in LED Multi-wire Saw

Peng Siqi<sup>1,2</sup> Dai Yuxing<sup>1</sup> Jiang Jin<sup>1</sup>

1. Hunan University, Changsha, 410082 2. Xiangtan University, Xiangtan, Hunan, 411105

**Abstract:** A synchronous control is the crucial to success on LED multi-wire saw control system. The stress model of traditional multi-wire saw slicing process was analyzed. Aiming at the limitation of the current system, a rocking processing roller equipment was proposed, and a fuzzy iteration control policy was given in the synchronous control of LED multi-wire saw. Comparing with the sole fuzzy control, this strategy has considered fully the structural feature of the improved multi-wire saw and many kinds of disturbances during the operation processes. The PD fuzzy controller enables the system to achieve the steady state rapidly, and the system has certain precision. After achieving steady state, the iterative study controller can eliminate the PD fuzzy controller's static error. The experimental contrast proves that this algorithm has high control precision and good quality of slice.

**Key words:** LED; multi-wire saw; rocking equipment; fuzzy iteration control; synchronization control

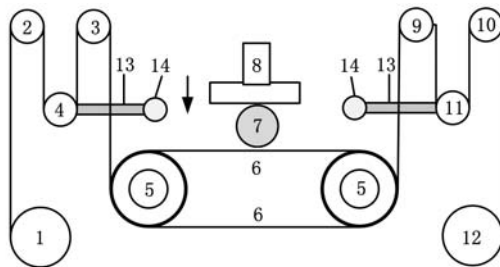
## 0 引言

LED 多线切割机是 LED 基材切割的专用装备,是传统多线切割机的升级换代。近年来,国内科研机构和企业在多线切割机方面的研究有长足进步,如文献[1]提出一种无模型自适应控制的方法,该方法通过建立虚拟主轴,对收放线轮进行迭代运算控制,得到较好的控制效果,但国内研究成果多限于传统多线切割机<sup>[2]</sup>。LED 多线切割机控制系统复杂、制造难度大,国际上只有日本 Takatori 和瑞士 Meyer Burger 两家公司掌握其技术,推出了产品。国外文献中有将金刚石线用于传统多线切割机的研究<sup>[3]</sup>,但未见该机型控制方法的公开报道。本文给出了 LED 多线切割机的模糊迭代同步控制方法,并成功应用于国产 LED 多线切割机。

## 1 传统多线切割方式存在的问题

传统多线切割方式如图 1 所示。加工罗拉均

匀刻有数百道槽,每条槽内嵌入一根金刚石线。两个加工罗拉旋转带动金刚石线高速往返运动,LED 基材固定在工作台上,高速运动的金刚石线将向下运动的 LED 基材切成薄片<sup>[4]</sup>。



1. 放线轮 2, 3, 4, 9, 10, 11. 导线轮 5. 加工罗拉  
6. 金刚石线 7. LED 基材 8. 工作台 12. 收线轮  
13. 张力摆杠 14. 张电力电机

图 1 传统多线切割机结构示意图

切片过程中必须做到两点:①保持收放线轮的线速度和加工罗拉的线速度完全一致。由于金刚石线直径为 0.12~0.8mm,线速度为 450~600m/min,故收放线轮的直径在切片过程中是不断变化的。如果线速度不一致,金刚石线将会瞬间崩断,导致昂贵的 LED 基材报废。②加工罗拉中嵌入的金刚石线张力均匀。这是保证切片质量的基础条件,张力过大会引起断线,张力过小则会

收稿日期:2011-02-21

基金项目:国家重大科技专项(2009ZX02011-02);国家发改委科研项目(20091168);湖南省重点科技计划资助项目(2009CK2005);湖南省教育厅资助科研项目(10C1282)

使得加工出来的 LED 基片翘曲度较大、平行度较差、表面粗糙,增加后续工作的难度。系统张力通过伺服电机设定,将伺服电机设为恒转矩控制模式,设定的转矩值除以张力摆杠的长度就是对金刚石线施加的张力。张力摆杠偏移平衡位置的角度反映了系统线速度同步误差;张力摆杠在平衡位置附近抖动剧烈表示张力波动剧烈,反之,则表示张力稳定。因此将对张力恒定的同步控制转化为对系统线速度的同步控制。

笔者在对大量切片数据做了分析后,发现传统多线切割方式存在切割效率低、切片质量较差的问题。如图 2 所示, $F$  为 LED 基材与金刚石线间的下压力, $r$  为 LED 基材半径, $b$  为金刚石线与 LED 基材接触长度的一半, $x$  为 LED 基材截面圆心到金刚石线的垂直距离, $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  为切割过程中金刚石线的三个位置。张力一定的情况下,金刚石线对 LED 基材的压力与金刚石线和 LED 基材的接触面积成反比。

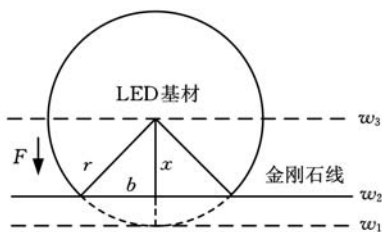


图 2 LED 基材与金刚石线的相对位置

当金刚石线位于  $\omega_1$  位置时,LED 基材与金刚石线接触面积小,压力较大,切割速度高。随着工件台下降,金刚石线相对 LED 基材的位置上升,LED 基材与金刚石线的接触面积变大,压力变小,切割速度变低。当金刚石线位于  $\omega_3$  位置时,切割速度最低,之后切割速度逐渐变高。考虑一般情况,LED 基材与金刚石线接触面积为

$$S = 2bL \quad (1)$$

$$b = \sqrt{r^2 - x^2} \quad (2)$$

工作台的移动距离为

$$a = r - x \quad (3)$$

其中, $L$  为 LED 基材的长度,则工件台的速度

$$v = da/dt = -dx/dt \quad (4)$$

式中, $t$  为时间。

将式(2)~式(4)代入式(1)得

$$S = 2L \sqrt{r^2 - (r - vt)^2} = 2L \sqrt{r^2 - (r + t dx/dt)^2} \quad (5)$$

在忽略次要因素的情况下, $F = -\mu dx/dt$ , $\mu$  为压力比例系数。则压力

$$p = \frac{-\mu dx/dt}{2L \sqrt{r^2 - (r + t dx/dt)^2}} \quad (6)$$

若工作台匀速下降,则  $-dx/dt$  为常数, $p$  在

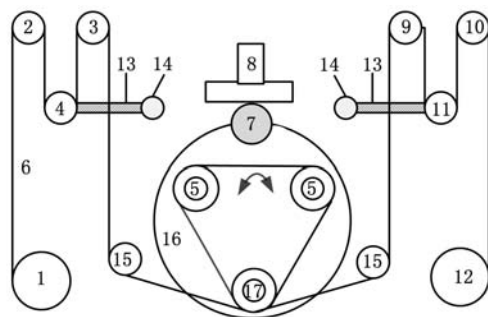
$\omega_1$  位置时较大, $\omega_3$  位置时较小。LED 切片表现为  $\omega_1$  位置的切口平整度较好,但金刚石线未充分利用,造成浪费; $\omega_3$  位置时较为粗糙,且金刚石线磨损严重。若速度设置过大,在切割中段基材时会造成断线;若速度设置过小,则切割效率低下。

若工作台变速下降,则式(6)为二阶非线性函数,且无法改变接触面积  $S$  小  $\rightarrow$  大  $\rightarrow$  小的变化过程。

系统的两难处境使得单纯依靠改进控制算法不容易保持  $p$  恒定,不容易提高切割效率,必须改进机械结构。

## 2 机械结构的改进

机械结构改进方法:用一个可以转动的圆盘代替传统多线切割机固定结构,在转动圆盘上安装三个结构对称的加工罗拉,如图 3 所示,上面的两个是主动加工罗拉,下面的一个是从动加工罗拉。两个主动罗拉通过金刚石线带动从动罗拉同步高速往复旋转,与此同时,转动圆盘做  $\pm 5^\circ$  的摇动。



1. 放线轮 2,3,4,9,10,11. 导线轮 5. 加工罗拉  
6. 金刚石线 7. LED 基材 8. 工作台  
12. 收线轮 13. 张力摆杠 14. 张力电机  
15. 导线轮 16. 转动圆盘 17. 从动罗拉

图 3 LED 多线切割机的结构示意图

这种设计能够使金刚石线和 LED 基材保持弧面接触,工作台匀速运动时,接触面积变化不大,可以充分利用金刚石线,切割效率显著提高。但这给系统控制提出了新的问题:①转动圆盘运动时会造成收线侧和放线侧金刚石线时松时紧,若不加控制,摆杠会剧烈抖动,严重时断线;②由于机械设计上的原因,加工罗拉和转动圆盘运动相互干涉,即转动的圆盘对加工罗拉有一个附加转速,使得加工罗拉的实际转速和控制指令转速不一致。加之传统多线切割机本身存在的非线性问题,如收放线半径的变化、加工罗拉槽位磨损等,都给系统多电机同步控制带来了困难,传统多线切割机的控制算法不能直接使用,必须采用其他先进算法。

### 3 系统的模糊学习迭代同步控制算法

#### 3.1 系统的模糊同步控制方法

模糊控制器能够把专家知识转化为控制系统的模糊集,利用一定的模糊推理规则,这些模糊集能够对系统的输出进行智能调节。这种控制方法不需要精确的数学模型,具有响应速度快、调整时间短、鲁棒性强的特点<sup>[5-6]</sup>。本系统采用 PD 型两输入、单输出模糊控制器对主轴电机和收放线轮电机进行控制。模糊控制器结构如图 4 所示。模糊控制器输入为误差  $e$  和误差变化率  $ec$ ,与其对应的语言变量为  $E$  和  $EC$ 。

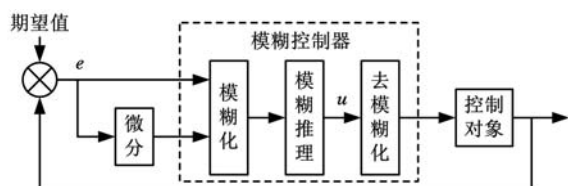


图 4 模糊控制器结构图

以  $EC$  为例,其论域取  $[-10, 10]$ ,语言值取 7 个,即  $[NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB]$ 。其中,  $NB$  取 Z 形隶属度函数,  $PB$  取 S 形函数,其余取三角形隶属度函数<sup>[7]</sup>。输入  $e$  和输出  $u$  与  $ec$  相似。以放线轮为例,若  $E, EC$  均为  $NB$ ,则表示放线轮与设定转速误差正大,误差变化趋势也正大,因此放线轮要以大的加速度加速,模糊规则共 49 条。LED 多线切割机高速运行达到稳定状态时,张力摆杠在平衡位置附近小幅抖动,往复旋转的换向期间抖动尤为剧烈。笔者尝试增加论域上的离散点,即将论域上的离散值增加至 9 个,为  $[NB, NM, NS, NW, Z, PW, PS, PM, PB]$ ,相应模糊规则增加至 81 条,但张力摆杠的抖动现象并无明显好转。且模糊规则的增加会延长控制器的扫描时间,影响实时控制。实际上,由于

$$E(k) = \text{INT}[K_1 e(k) + 0.5] \quad (7)$$

$$EC(k) = \text{INT}[K_2 ec(k) + 0.5] \quad (8)$$

$$C(k) = f(E(k), EC(k)) \quad (9)$$

式中,  $K_1, K_2$  分别为误差和误差变化率的量程转换比例因子;  $\text{INT}(\ast)$  表示取整运算。

当  $|K_1 e(k)| < 0.5$  时,  $E(k) = 0$ ; 当  $|K_2 ec(k)| < 0.5$  时,  $EC(k) = 0$ 。当系统进入稳态后,  $ec(\infty) = 0$ , 但  $e(\infty)$  未必为 0, 若  $|K_1 e(\infty)| < 0.5$ , 则  $E(\infty) = 0$ , 从而控制增量为 0, 系统保持稳态。由  $|K_1 e(\infty)| < 0.5$  可以得出  $e(\infty) < 1/|2K_1|$ , 即当模糊控制器进入稳定状态后, 实际控制误差在零域  $(-1/(2K_1), 1/(2K_1))$  中, 由此可见, 系统此刻输出误差实际上不为零, 而

PD 型模糊控制器对此已经无能为力了。

模糊控制器中增加积分项可以提高稳态控制精度, 但积分项的加入也改变了系统的动态性能。加入积分调节会使稳定性下降, 动态响应变慢。系统在启动、结束或大幅度改变设定时, 系统输出产生较大偏差, 造成积分积累, 引起系统较大的超调, 导致断线, 这在 LED 多线切割机中是不允许的。

#### 3.2 模糊迭代同步控制方法

迭代学习控制利用上一周期的控制输出以及误差信号经过一定的迭代学习方法得到下一个周期的控制信号。经过几个周期的学习过程, 就可以使误差趋近于零, 达到所需的控制精度要求。模糊控制和迭代学习控制相结合可以使系统既有较高的响应速度, 又有较高的稳态精度。现仅以放线侧同步控制来说明(收线侧是其逆过程)。如图 5 所示, 模糊控制器和迭代学习控制器组成模糊迭代控制器, 该控制器输出为

$$U_{ok}(T) = U_{mo}(T) + U_{i,k}(T)$$

式中,  $U_{mo}(T)$  为模糊控制器输出;  $U_{i,k}(T)$  为迭代学习控制器输出,  $U_{i,k}(T) = U_{i,k-1}(T) + G(s)e_{k-1}(t)$ ;  $G(s)$  为学习函数。

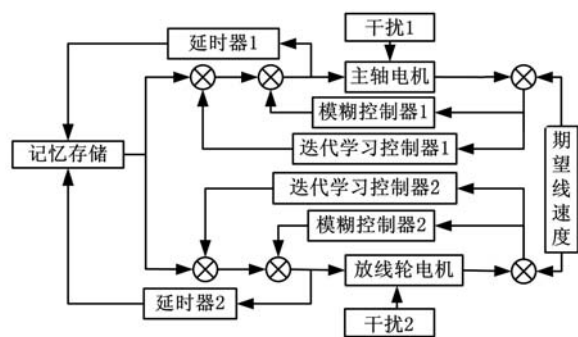


图 5 模糊迭代控制流程图

图 5 中, 干扰 1 为系统运行时, 加工罗拉和转动圆盘相互干涉对加工罗拉的附加转速。干扰 2 为转动圆盘摆动时, 收线侧和放线侧的金刚石线时松时紧的状态。期望线速度分别转化为主轴电机和放线轮电机的期望角速度。

具体的控制步骤如下:

(1) 设定机器工作时的参数(期望线速度、摇摆轴的摆动速度和幅度), 同时将线速度转化为各轴角速度;

(2) 通过模糊控制, 系统迅速达到稳定状态, 当出现干扰或者给定变化以后, 模糊控制可以实现快速响应, 并具有一定精度;

(3) 迭代学习控制通过几个周期学习以后可以消除稳态误差, 使系统达到较高的精度。

## 4 实验

主控制器为日本安川的 MP2000 系列运动控制器,主电机和放线电机均采用安川公司的  $\Sigma V$  系列伺服电机和伺服驱动器,张力传感器采用瑞士 FMS 公司的 RMGZ121A,张力摆杠长度为 132mm,记录时间为 8.4s,主电机的运行速度为 600m/min,金刚石线的直径为 0.5mm。

根据 LED 多线切割机样机实际运行状态,利用运动控制器开发软件 MP720 记录走线速度、切割线上的张力及张力摆杠角位移,并将观察数据导入至 Excel 文档保存,观测数据用 MATLAB 分别绘制各参量的波形,模糊控制与模糊迭代控制的实验结果如图 6、图 7 所示。

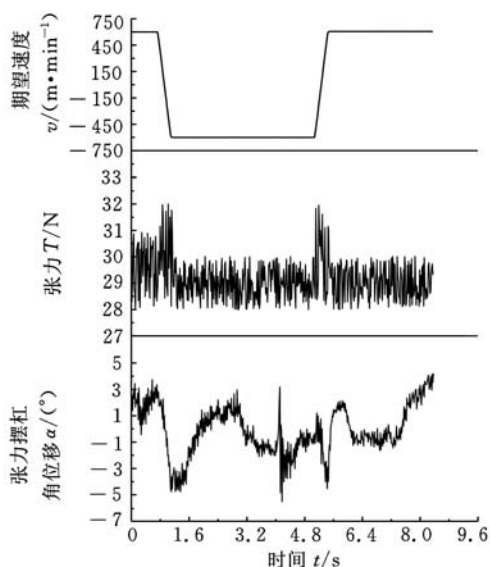


图 6 模糊控制实验结果

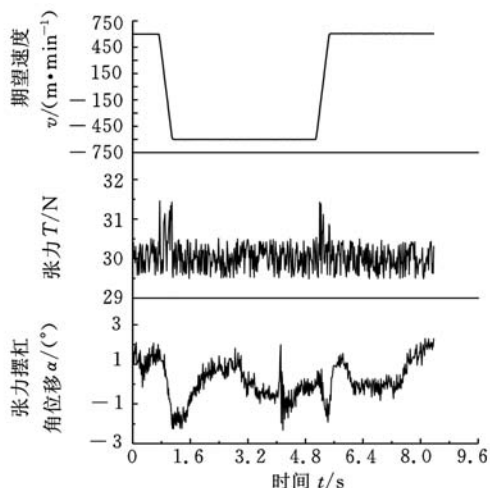


图 7 模糊迭代控制实验结果

系统以线速度 600m/s 做往返运动,其中正转时间 3s,反转时间 2s,过渡时间 1s。采用伺服系统 S 型速度过渡,保证平滑,张力值设定为 30N。由图 6 可知,切割线张力波动范围在 29~

32N 之间,张力摆杠角位移波动范围在  $\pm 5^\circ$  之间,稳定精度不太理想。图 7 为模糊迭代控制波形图,系统进入稳定状态时,切割线张力波动范围在 29.5~31N 之间,张力摆杠角位移波动范围在  $-0.5^\circ \sim 2^\circ$  之间,且切割线张力波动集中在过渡时间,高速运动下张力摆杠运动平滑。放线轮和主轴电机的线速度能够跟随系统期望线速度。由此可以看出:模糊迭代控制系统的控制精度较高。

## 5 结论

(1)通过分析传统多线切割机切片的受力模型,得到了传统多线切割机高速切割 LED 材料时容易断线和切割质量不稳定的原因——压力  $p$  不恒定。

(2)设计出一种带摆动装置的机械结构,该结构能在工作台匀速运动的条件下,使得金刚石线和 LED 基材基本保持接触面积不变。并根据改进后的机械结构,充分利用模糊控制和迭代学习控制的优点,给出了模糊迭代的控制方法。

(3)通过实验,对比了模糊控制和模糊迭代控制算法的运行结果,证明了本文算法的有效性。

### 参考文献:

- [1] 蒋近,戴瑜兴,彭思齐.多线切割机控制系统的研制[J].中国机械工程,2010,21(15):1780-1784.
- [2] 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.
- [3] Clark W I, Shih A J, Hardin C W, et al. Fixed Abrasive Diamond Wire Machining—Part I: Process Monitoring and Wire Tension Force[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(5):523-532.
- [4] Zhang B, Liu W, Hu X, et al. Application and Development of Wire Sawing Technology[J]. Superhard Material Engineering, 2008, 20(1):45-48.
- [5] 张代林,陈幼平,艾武,等.永磁直线电机保证稳态精度的模糊控制[J].电工技术学报,2007,22(4):65-68.
- [6] 何仁,刘存香,李楠.轿车电磁制动与摩擦制动集成系统的模糊控制[J].机械工程学报,2010,46(24):83-87.
- [7] 吴飞青,马修水,关宏伟,等.基于模糊专家控制的织机经纱恒张力控制研究[J].中国机械工程,2008,19(4):384-387.

(编辑 张洋)

作者简介:彭思齐,男,1978年生。湘潭大学信息工程学院讲师,湖南大学电气与信息工程学院博士研究生。研究方向为工业智能控制、智能信号处理。发表论文 8 篇。戴瑜兴,男,1956年生。湖南大学电气与信息工程学院教授、博士研究生导师。蒋近,男,1979年生。湖南大学电气与信息工程学院博士研究生。