

# 基于电流控制的柔性研磨技术

彭丽文<sup>1</sup>, 姚斌<sup>1\*</sup>, 王道<sup>1</sup>, 赵其平<sup>2</sup>, 陆如升<sup>1</sup>

(1. 厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 广东珠海镇东有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 针对厚度为 0.1~3.5 mm 的印制电路板在研磨过程中刚度差的问题, 介绍了一种基于电流控制的柔性研磨技术. 在刷辊研磨过程中, 根据刷辊转动电机的瞬时测量电流与预期设定电流的比较结果, 控制脉冲的发送频率与数目, 从而实现伺服电机以不同速度调整磨削深度, 即实现恒定磨削力的研磨过程. 实验结果表明, 采用电流控制的柔性研磨系统可以高效而又精确地研磨印制电路板.

**关键词:** 柔性磨削; 刷辊; 电流控制; 印制电路板

中图分类号: TP 273. 2; TG 58

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2011)06-0998-04

印制电路板 (printed circuit board, PCB) 是重要的电子部件, 其主要功能是支撑电路元件和互联电路元件. PCB 表面的铜箔在电路中起信号传输的作用. 按铜箔厚度可分为厚铜箔 ( $>70 \mu\text{m}$ )、常规厚度铜箔 ( $18\sim70 \mu\text{m}$ )、薄铜箔 ( $12\sim18 \mu\text{m}$ ) 和超薄铜箔 ( $<12 \mu\text{m}$ )<sup>[1]</sup>. 在 PCB 板制作工艺中, 一般要通过刷磨机对 PCB 进行研磨, 其目的: 一方面用于钻孔后毛刺, 电镀后铜渣和铜瘤的去除, 另一方面用于 PCB 表面金属的抛光研磨, 因 PCB 表面铜箔厚度的均匀性对电路性能有很大影响, 且 PCB 板在研磨时存在一个非常突出的问题——刚度差, 而采用柔性研磨技术可以很好地解决这个问题. 柔性研磨方式具有控制磨削力并保持其恒定的功能<sup>[2-4]</sup>.

## 1 研磨原理

### 1.1 刷磨机工作原理

在刷磨机的结构原理图 (图 1) 中, 1 号刷辊和 3 号刷辊安装在传送辊上方, 2 号刷辊和 4 号刷辊安装在传送辊下方. 在进板及出板处分别安装有传感器用于检测 PCB 板的进出状态; 传送辊由三相异步电动机带动, 绕其轴线旋转, 通过电机的反馈脉冲数来判断 PCB 板是否达到刷磨位置; 在传送辊的正上方安装有压紧辊, 用于压紧研磨过程中的 PCB 板, 防止 PCB 板与传动辊发生相对滑动; 每个刷辊轴都具有 3 个运动:

- 1) 由三相异步电动机带动刷辊轴绕其轴线的旋转运动 (周向运动, 如图 1 中 a 所示);
- 2) 由三相异步电动机带动刷辊轴的沿其轴线的往复运动 (轴向运动, 如图 1 中 c 所示);
- 3) 由伺服电机带动刷辊轴的靠近或远离背压辊的加压或减压运动 (径向运动, 如图 1 中 b 所示).

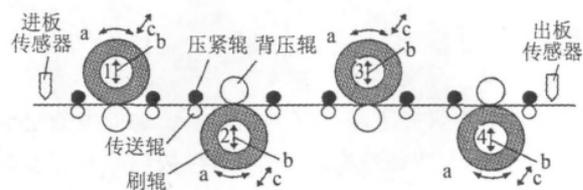


图 1 刷磨机结构原理图

Fig. 1 Skeleton drawing of brushing machine

### 1.2 刷辊结构

随着 PCB 研磨技术的发展, 刷磨用柔性刷辊有陶瓷刷辊和不织布 (non-woven) 刷辊等类型<sup>[3]</sup>. 其中陶瓷刷辊结构如图 2(a), 陶瓷块是通过专用的胶粘剂粘在海绵辊上; 不织布刷辊的结构如图 2(b), 磨料是镶嵌在不织布上. 陶瓷刷辊和不织布刷辊的磨粒、粒度和尺寸等参数如表 1. 海绵或不织布的弹性变形使刷辊在研磨过程中不仅改变刷辊与 PCB 板的接触曲率半径, 而且减小了刷辊与 PCB 板接触时的瞬变效应.

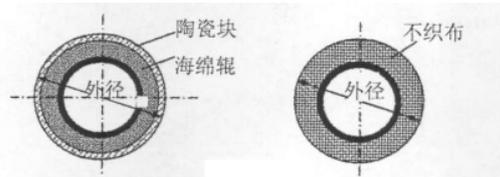
### 1.3 磨削力分析

在研磨过程中, 刷辊与 PCB 板进行相对运动, 相对运动分为主运动、进给运动和切入运动, 在图 3 中分别用  $P$ 、 $F$ 、 $I$  表示. 为便于分析问题, 磨削力分解为 3 个相互垂直的分力, 即沿刷辊切向的切向磨削力  $F_t$ , 沿刷辊径向的法向磨削力  $F_n$  和沿刷辊轴向的轴向磨

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 国家科技重大专项 (2010ZX04001-162)

\* 通信作者: yaobin@xmu.edu.cn



(a) 陶瓷刷辊端面结构 (b) 不织布刷辊端面结构

图 2 两种刷辊端面结构示意图

Fig. 2 Sectional views of two brushing roller

表 1 刷辊参数

Tab. 1 Information of brushing roller

| 刷辊类型 | 磨粒                           | 粒度/ $\mu\text{m}$ | 外径/mm   | 长度/mm     |
|------|------------------------------|-------------------|---------|-----------|
| 陶瓷   | SiC                          | 5.5~250           | 142~160 | 1000~1500 |
| 不织布  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、SiC | 44~250            | 142~350 | 1000~1500 |

削力  $F_a$ . 其中, 轴向分力  $F_a$  较法向分力  $F_n$  相比可以忽略不计. 刷辊研磨 PCB 板简图如图 3.

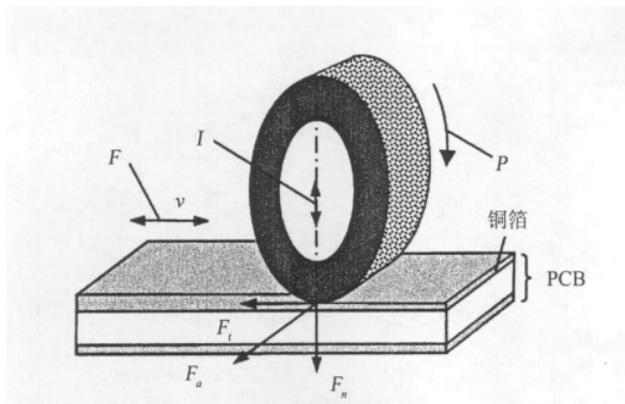


图 3 研磨 PCB 简图

Fig. 3 Skeleton drawing of grinding PCB

由文献[5], 可以得到:  $F_t v = (60 \times 1000) \eta_e P$ , 即

$$F_t = \frac{6 \times 10^7 \eta_e P}{\pi D N}, \quad (1)$$

由电机学原理可知

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi, \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)式可得

$$F_t = \frac{1.8 \times 10^8 \eta_e UI \cos \varphi}{\pi D N}. \quad (3)$$

为了对磨削深度与磨削力之间的关系进行分析, 可将细磨粒简化为圆锥体, 如图 4.

即可得到  $\sigma_s = \frac{2F_m}{\pi \alpha_p^2 \tan^2 \alpha}$ , 即

$$\alpha_p = \sqrt{\frac{2F_m}{\pi \sigma_s \tan^2 \alpha}}, \quad (4)$$

由文献[6], 有

$$F_n = \rho F_t = \rho \frac{1.8 \times 10^8 \eta_e UI \cos \varphi}{\pi D N}, \quad (5)$$

由式(4)、(5)可得

$$\alpha_p = \frac{6 \times 10^3}{\pi \tan \alpha} \times \sqrt{\frac{10 \times \rho \eta_e UI \cos \varphi}{n D N \sigma_s}}, \quad (6)$$

其中,  $F_t$  为刷辊的切向磨削力,  $v$  为刷辊轮线速度;  $\eta_e$  为电动机效率,  $P$  为刷辊转动电机功率;  $D$  为刷辊外径,  $N$  为刷辊转速,  $\alpha$  为假想圆锥磨粒的半角;  $F_m$  为单个磨粒所承受的压力,  $\sigma_s$  为铜箔的屈服点;  $\rho$  为磨削力比 (通常取  $\rho = 1.5 \sim 3.0$ ),  $n$  为参与磨削的磨粒数目.

从式(4)看出, 改变法向磨削力  $F_n$  的大小可以使磨削深度得以变化. 从式(5)看出, 磨削力  $F_n$  得以变化是由于电流值的改变. 且从式(6)可以看出, 通过改变电流的大小来实现控制研磨力的恒定, 从而获得较高的刷磨均匀性[6].

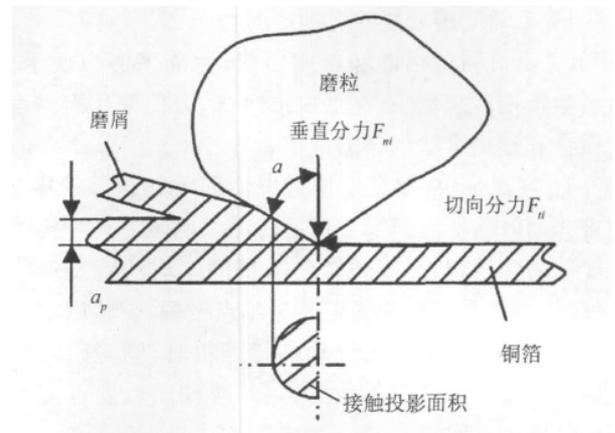


图 4 磨粒与 PCB 接触模型

Fig. 4 Contact model between abrasive and PCB

## 2 控制系统结构

### 2.1 系统硬件配置

控制系统由人机界面、可编程逻辑控制器 (PLC)、调压系统、摆动系统和传动系统等 9 部分组成. 其中, 人机界面设计的主要内容是创建画面, 并将界面中各对象属性中的软元件与 PLC 程序及内部软元件联系起来, 实现人机界面与 PLC 之间的通信, 从而实现参数设置、显示和其他操作控制. 由特殊功能定位模块、伺服放大器和伺服电机组成的调压系统, 能够精确控制脉冲发送个数和脉冲发送频率, 从而实现刷辊吃刀量的微量调整; 在转动系统中, 为采集和改变刷辊转动用电机的电流值, 选用 A/D 和 D/A 特殊功能模块.

### 2.2 伺服定位

刷辊磨削深度 (如图 4) 由伺服电机控制, 伺服电

机由 PLC 控制. PLC 主要向伺服驱动器发送两组信号,一组是伺服脉冲信号,脉冲信号的发送数量决定了伺服电机的旋转角度,脉冲信号的发送频率与伺服电机的转速成正比;另一组是伺服电机正反转信号,当反转信号 RP 为高电平时,伺服电机反转;当正转信号 FP 为高电平时,伺服电机正转. 因对研磨精度要求高,伺服每前进或后退 0.3 mm 位模块即向伺服放大器发送 3 000 个脉冲,相当于一个脉冲前进或后退 0.1 μm,即实现了对丝杠的精确定位.

### 3 软件设计

#### 3.1 控制要求

根据 PCB 研磨工艺的要求,控制系统主要包括如下几个功能模块:

1) 手动研磨功能和自动研磨功能;

2) 刷痕测试功能和整刷功能,为确保磨板质量,投料生产前或换刷后,先做刷痕测试,以便确认刷辊表面质量和选择合适的研磨电流;

3) 零点定位:零点定位有电流归零和位移归零 2 种方式. 其中,电流归零方式是转动的刷辊靠近并接触到转动的背压辊,当刷辊转动电机的电流达到设定电流值时,则此是伺服位置定义为零点位置;位移归零方式是刷辊靠近并接触到转动的背压辊时,刷辊因摩擦力作用而被带动一定的角度,则此时伺服位置定义为零点位置;

4) 计算刷辊直径和刷辊位置,刷辊转速在 1 000 ~ 2 300 r/min 范围内可调.

由 PCB 的研磨工艺要求,程序控制流程如图 5 所示.

#### 3.2 磨削深度精确控制

控制程序采用位置控制方式,即通过位置控制保持一定刷磨电流的自动控制方式. 在位置控制程序中,通过传动系统电动机的反馈脉冲数与 PCB 板从入板传感器处到各轴所需的脉冲数比较,来判定进板是否到达各轴的刷磨位置. 当 PCB 板到达各轴研磨位置时,则调用相应轴的研磨电流比较程序. 在研磨过程中,通过刷辊转动电机反馈电流与预设电流的比较结果来控制伺服脉冲的发送频率与数目(控制伺服电机的转速和旋转角度)即可实现伺服电机以不同速度调整刷辊吃刀量,从而实现研磨力恒定,进而获得较高的研磨均匀性和研磨精度. 伺服电机控制流程如图 6.

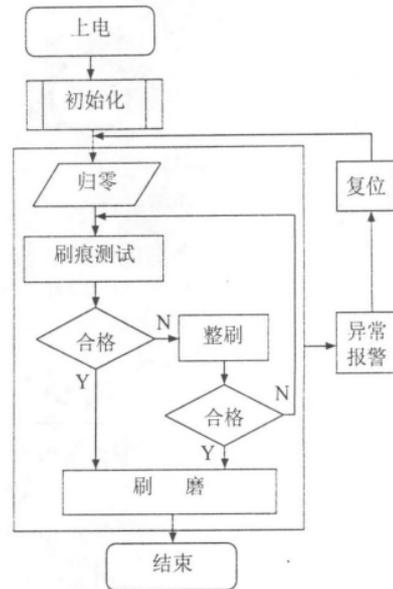


图 5 系统流程图

Fig. 5 Control system program flow chart

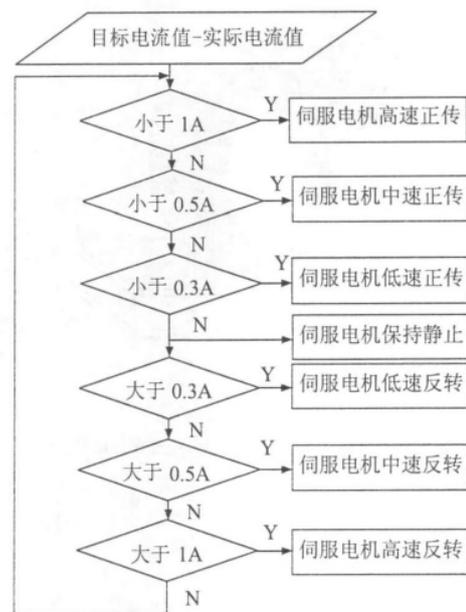


图 6 磨削深度控制流程图

Fig. 6 Control flow chart of grinding depth

## 4 结 论

为检测研磨质量,在研磨前后分别利用电子扫描显微镜(型号为 SEM2000,加速电压设置为 20 kV,放大倍数为 3 000)观测 PCB 的表面情况. 其中图 7(a)是研磨前 PCB 表面的电子扫描显微镜图片,可以看出,研磨前的 PCB 表面纹理无规则;图 7(b)是利用陶瓷

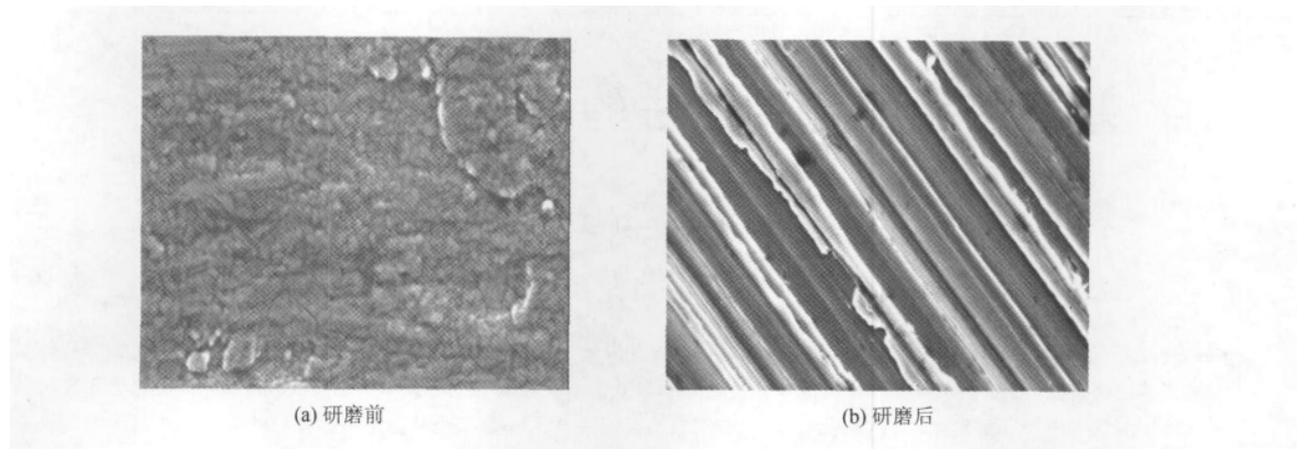


图 7 PCB 表面电子扫描显微镜图  
Fig. 7 Scanning electron map of PCB

刷辊研磨 2 次后的 PCB 表面电子扫描显微镜图片,可以看出,研磨后 PCB 表面的纹理清晰,每条纹路宽度基本一致,各纹路之间基本保持平行.由此可见,采用基于电流控制的柔性研磨技术是完全能满足生产的要求.

通过采用伺服系统双闭环控制(位置环和速度环)刷辊的柔性研磨系统<sup>[7]</sup>,实现了单次平均研磨去除厚度在  $0.6 \mu\text{m}$  以下,达到对 PCB 板的高精度的柔性研磨.经过初步调试表明,系统运行可靠、研磨精度高,对于研磨低刚度薄板具有极大的推广价值.

#### 参考文献:

- [1] 刘书桢.印制电路板用铜箔的表面处理[J].电镀与精饰,2008,30(2):17-21.
- [2] 李成群,负超,张习加,等.机器人柔性磨削机床的恒磨削力补偿机构及其动力学分析[J].机械科学与技术,2008,26(6):701-705.
- [3] Hahn R S. Controlled force grinding—a new technique for precision internal grinding [J]. Journal of Engineer for Industry,1964,86(9):287-290.
- [4] Bzymek Z K, Song G. Design of flexible grinding wheel with variable hub thickness [J]. Journal of Engineering for Industry,1994,115(8):260-262.
- [5] 庄司克雄.磨削加工技术[M].郭隐彪,王振忠,译.北京:机械工业出版社,2007:87-90.
- [6] 李伯民,赵波.现代磨削技术[M].北京:机械工业出版社,2003:254-261.
- [7] 苑洪侠,赵元军,王国宏,等.控速与控制力相结合的定程磨削方式[J].轴承,2008,35(2):20-21.

## The Flexible Grinding Technology Based on the Electric Current Control

PENG Li-wen<sup>1</sup>, YAO Bin<sup>1\*</sup>, WANG Xiao<sup>1</sup>, ZHAO Qi-ping<sup>2</sup>, LU Ru-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
2. Guangdong Zhuhai Goal Searchers Co., Ltd, Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** A flexible grinding technology based on the electric current control is presented to resolve the problem of low rigidity of PCB on grinding, the thickness of which varies from 0.1 mm to 3.5 mm. The comparative results between the real-time and setting current during grinding control the frequency and the number of servo pulse and then the servo motor adjusts the grinding depth of cut at several different speeds, in order to realize the constant grinding force in the process of grinding. The results show that the PCB can be grinded efficiently and accurately by means of the flexible grinding technology based on current electric control.

**Key words:** flexible grinding; brush roller; electric current control; printed circuit board (PCB)