

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.04.016

砂轮划片机划切工艺参数优化方法

孙红春¹, 王宏宝², 胥勇¹, 谢里阳¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 北车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116041)

摘 要: 针对砂轮划片机划切工艺参数在实际生产中难以合理设定的问题,提出了基于 Matlab 遗传算法优化和确定最佳工艺参数的方法. 在避开各阶固有频率的基础上选取工艺参数范围,以主轴振动均方根值为评价指标,利用回归正交设计法进行试验,建立了振动量与划切工艺参数之间的回归方程. 利用 Matlab 遗传算法对所建回归方程进行迭代优化,得出对应最小振动量下的最佳工艺参数,对最佳工艺参数下的划切振动量进行试验验证,证明了优化结果的正确性.

关 键 词: 砂轮划片机;工艺参数;回归正交设计;遗传算法;优化

中图分类号: TH 113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)04-0531-05

Optimization Method of Cutting Process Parameters for Dicing Saw

SUN Hong-chun¹, WANG Hong-bao², XU Yong¹, XIE Li-yang¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. CNR Dalian Electric Traction R & D Center Co., Ltd., Dalian 116041, China. Corresponding author: SUN Hong-chun, E-mail: hchsun@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The cutting process parameters of dicing saw are difficult to get in actual production, an optimization method was thus proposed to establish the best cutting parameters based on genetic algorithm of Matlab. The scope of the cutting process parameters was selected by avoiding the natural frequency of every order, and the root mean square of the axis vibration was used as the evaluation index. The regression equation was established between parameters of vibration and cutting processes by regression orthogonal design. The best cutting parameters according to the minimum vibration were obtained by using the Matlab genetic algorithm to make iterative optimization for the regression equation. The optimization result was verified by experiments.

Key words: dicing saw; process parameters; regression orthogonal design; genetic algorithm; optimization

划片机是太阳能电池和集成电路生产中划片工序的必备关键设备之一,其精度直接影响晶片的成品率和生产效率.实际生产中,划切工艺参数的设定是影响砂轮划片机加工精度的重要因素,划切工艺参数的不合理设定会引起设备的振动加剧,而设备的振动可直接反映其加工精度^[1].同时划切工艺参数选取对延长划片设备的使用寿命、增加划切晶片的成品率及提高晶片的生产效率具有重要意义.近年来,对划切参数方面的研究尚停留在人为选取方面,并没有找到划切工艺参

数与设备振动量之间的对应关系^[2].本文提出利用回归正交设计法建立振动量与划切工艺参数之间的回归方程,并利用 Matlab 遗传算法对所建回归方程进行迭代优化,研究结果表明此方法能够得出对应最小振动量下的最佳工艺参数组合,同时通过试验验证了最佳工艺参数选取的合理性.

1 回归正交设计法

在工业生产中,为寻求最佳工艺参数,正交试

验法具备十分显著的优点(正交性)^[3]. 回归分析的意义是利用已有的试验数据,在给定的区域内寻找因素与指标之间明确的函数表达式,建立生产过程的数学模型. 本文采用回归正交设计法,建立砂轮划片机划切工艺参数与振动特征量之间准确的函数关系并寻优.

1.1 划切工艺参数

砂轮划片机划切工艺参数主要包括主轴转速、X 轴进给速度及冷却液流量^[4-5]. 这三种工艺参数是影响划切质量的主要因素,且它们之间的交互影响尤为重要. 对于镍基刀切割硅片,工艺参数的选取范围为:主轴转速 28 000 ~ 32 000 r/min, X 轴进给速度 80 ~ 100 mm/s,冷却液流量 0.4 ~ 0.6 L/min.

1.2 信号特征量的提取

旋转机械的振动信号包含大量的设备运转信息,通过有效的信号分析与处理手段提取到信号的特征量,可用于设备的状态监测及故障诊断. 在刀具、材料、工艺参数一定的条件下,砂轮划片机的振动量可以直接反映晶片的划切质量,故本文提取振动信号特征量作为回归方程的评价指标. 在振动信号中由于均方根值表征信号振动的能量大小,故选取均方根值作为特征量.

2 回归正交设计试验

试验工况为镍基刀切割硅片,试验将主轴转速、X 轴进给速度及冷却液流量作为自变量,将振动信号在稳态时的振动信号均方根值作为因变量,记录自变量参数值与因变量值的对应关系. 为使振动信号与各参数相关性最大,分别测试三个方向的振动信号并记录,每次试验切割三刀硅片取平均.

2.1 试验系统的搭建

正交设计试验系统的组成包括某型号精密砂轮划片机主轴切割系统、拾振系统(DH314E 三向压电式加速度传感器)、信号分析系统(DH5956 动态信号分析仪)、记录分析系统(笔记本电脑). 使用磁吸座将图 1 中三向压电式加速度传感器吸附在旋转主轴上,并将传感器 3 个接头接在动态信号分析仪 3 个通道上,同时动态信号分析仪与笔记本电脑用网线相连,试验测试系统搭建完成. X、Y、Z 向的设置如图 1 所示.

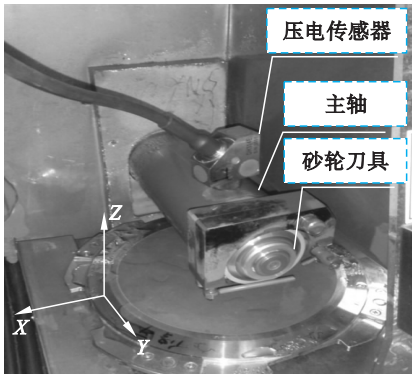


图 1 传感器及试验对象
Fig. 1 Sensor and experimental object

2.2 试验内容

1) 编码及制定因素水平:影响振动值 y 的因素包括主轴转速 N 、进给速度 V 及冷却液流量 L . 设振动值 y 与 N, V, L 的一次交互回归方程为 $y = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 V + \beta_3 L + \beta_{12} NV + \beta_{13} NL + \beta_{23} VL$. 使用一次回归正交设计,按照工艺参数选取范围制定因素水平表,见表 1.

表 1 一次回归正交设计因素水平表			
Table 1 Factors and level of linear regression orthogonal design			
水平	$N/(r \cdot \min^{-1})$	$V/(mm \cdot s^{-1})$	$L/(L \cdot \min^{-1})$
上水平(+1)	32 000	100	0.6
基准水平(0)	30 000	90	0.5
下水平(-1)	28 000	80	0.4
变化区间(Δ)	2 000	10	0.1

N, V, L 的编码为 x_1, x_2, x_3 , 则编码公式为 $x_1 = \frac{N - 30\,000}{2\,000}, x_2 = \frac{V - 90}{10}, x_3 = \frac{L - 0.5}{0.1}$. 回归方程转化为 $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3$. 式中, b 为待求正交设计系数. 根据正交试验设计,为估计常数项,在表 2 的最前面添加 x_0 列,取值皆为 1.

2) 试验数据记录及回归系数计算:编制因素水平一共进行 12 组试验,每组进行 5 次,共进行 60 次试验,回归系数及 5 次测试结果的平均值 y_1 (X 向), y_2 (Y 向), y_3 (Z 向)见表 2. 其中第 4 组数据为按经验选取划切参数工况下测得的数据. 9 ~ 12 行数据是失拟性检验的 4 次“0 水平”下的重复试验数据.

由表 2 中前 8 行计算一次回归正交设计系

数,计算结果见表 2(由于篇幅限制,只列出 X 方向计算结果).

表 2 试验数据
Table 2 Experimental data

试验组	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$\frac{y_1}{\text{m}\cdot\text{s}^{-2}}$	$\frac{y_2}{\text{m}\cdot\text{s}^{-2}}$	$\frac{y_3}{\text{m}\cdot\text{s}^{-2}}$
1	1	1	1	1	1	1	1	0.867	0.723	2.697
2	1	1	1	-1	1	-1	-1	0.808	0.737	2.687
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	0.907	0.690	2.783
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.890	0.730	2.773
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	1.747	0.663	2.487
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1.727	0.650	2.297
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1.683	0.650	2.607
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1.747	0.643	2.513
9	1	0	0	0	0	0	0	1.043	0.700	2.633
10	1	0	0	0	0	0	0	1.057	0.690	2.723
11	1	0	0	0	0	0	0	1.120	0.653	2.717
12	1	0	0	0	0	0	0	1.150	0.640	2.717
$B_j = \sum_{i=1}^8 x_{ij}y_{i1}$	10.448	-3.36	-0.006	-0.04	-0.094	0.048	0.054			
$d_j = \sum x_{ij}^2$	8	8	8	8	8	8	8			
$b_j = \frac{B_j}{d_j}$	1.306	-0.42	0	-0.005	-0.012	0.006	0.007			
$Q_j = \frac{B_j^2}{d_j}$	—	1.41	0	0	0	0	0			

3) 显著性检验:根据回归分析计算步骤进行 (由于篇幅限制,只列出 X 方向计算结果).
分析,方差分析结果见表 3(由于篇幅限制,只列

表 3 y_1 一次回归正交设计方差分析数据
Table 3 Variance analysis data of y_1 based on linear regression orthogonal design

变异来源	平方和	自由度	均方和	F 比	F 分布临界值	显著性
x_1	1.41	1	1.411 2	868.698	$F_{(1,1)}^{0.05} = 161.4$	***
x_2	0	1	0	0.002 8		—
x_3	0	1	0	0.123 1		—
x_1x_2	0	1	0	0.680 0		—
x_1x_3	0	1	0	0.177 3		—
x_2x_3	0	1	0	0.224 4		—
回归 $S_{\text{回}}$	1.413 2	6	2.4	144.984	$F_{(6,1)}^{0.1} = 58.2$	显著
剩余 $S_{\text{余}}$	0.001 6	1	0			
总体 $S_{\text{总}}$	1.414 8	7	—			

由表 3 可知, $F = 144.98 > F_{(6,1)}^{0.1} = 58.2$,说明 主轴转速有关且相关性很大.
回归方程在 $\alpha = 0.1$ 水平上显著. 其中只有 $F_{x_1} =$ 砂轮划片机 Y 方向和 Z 方向的计算过程与 X
 $868.698 > F_{(1,1)}^{0.05} = 161.4$,说明只有因素 x_1 是显著 向一致,最终建立回归方程为

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= 1.306 - 0.42x_1, \\ y_2 &= 0.685\,75 + 0.034\,25x_1 + 0.007\,5x_2 - 0.004\,25x_3 - 0.009\,25x_1x_3, \\ y_3 &= 2.605\,5 + 0.129\,5x_1 - 0.063\,5x_2 + 0.038x_3 - 0.033x_1x_3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

3 基于遗传算法划切工艺参数优化

3.1 遗传算法

遗传算法是求解复杂系统优化问题的一个通用框架,不依赖求解问题的种类及领域. 遗传算法实质是一种迭代算法,对新种群再进行选择、交叉和变异的遗传操作,如此反复,最终的变量值即为问题最优解^[6-8].

3.2 适应度函数的确定

应用遗传算法进行优化时,适应度函数的确定是重中之重,该函数的精确度直接影响优化结果. 本文适应度函数为式(1)所建立的回归方程,确定因素是编码后的因素值,约束条件为 $-1 < x_1 < 1, -1 < x_2 < 1, -1 < x_3 < 1$.

该目标寻优是一个典型的多目标优化问题(目标包括三个方向的振动量),可采用权重系数变换法对三个目标函数进行加权,将多目标优化问题转化为单目标优化问题,即将每个指标的线性加权和作为最终目标函数,可表示为

$$F = \sum_{i=1}^n \omega_i f(x_i) . \tag{2}$$

式中: F 为适应度函数; ω_i 为权数; $f(x_i)$ 为目标函数,其各指标的权重值等于各单目标最优值的倒数,此时函数反映了各个目标函数值离开各自最优值的程度. 在确定权重系数时只需求出各单目标的最佳值,无需其他信息^[9].

3.3 优化结果

将式(1)所示的各个指标作为单因素适应度函数,分别用遗传算法对三个方向的振动量进行优化. 迭代到 50 次,各单因素适应度值基本处于平衡状态,此时各单因素最佳适应度值为 0. 886,将其取倒数即为因素对应的权重值.

最终确定适应度函数为

$$y = \frac{1}{0.886}y_1 + \frac{1}{0.634}y_2 + \frac{1}{2.372}y_3 . \tag{3}$$

对新的适应度函数利用遗传算法优化^[10],得到最优解如图 2 所示.

当 $x_1 = 1, x_2 = 1, x_3 = 1$ 时, y 取得最佳值 32. 55,此时 $y_1 = 0.886, y_2 = 0.714, y_3 = 2.677$.

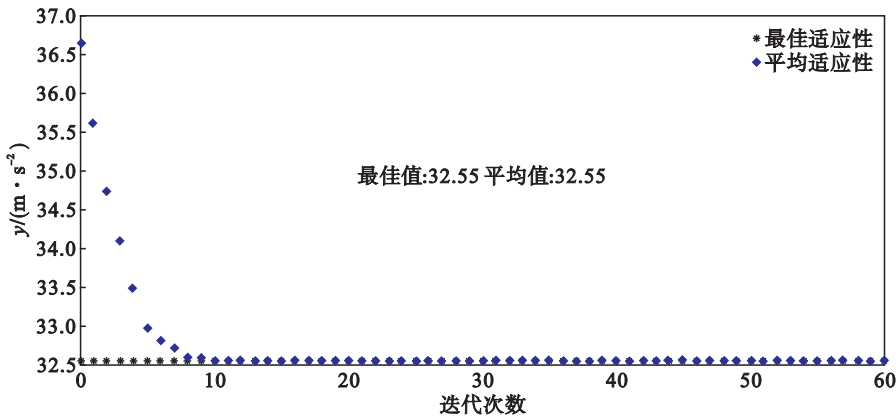


图 2 最终指标的最佳适应度值
Fig. 2 Best fitness values of final index

3.4 试验验证

由遗传算法得出的优化结果,经编码公式反解码可以得到各参数值: $N = 32\ 000\ \text{r/min}$, $V = 100\ \text{mm/s}$, $L = 0.6\ \text{L/min}$. 为证明优化结果,

现进行试验验证. 将设备使用镍基刀切割硅片的划切参数调整为 $N = 32\ 000\ \text{r/min}$, $V = 100\ \text{mm/s}$, $L = 0.6\ \text{L/min}$,按照回归正交设计试验方案,进行 5 次重复试验,得到试验结果见表 4.

表 4 试验结果(振动量)
Table 4 Experimental results (vibration)

方向						$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	
	1	2	3	4	5	优化后平均值	优化前平均值
X 向	0.886	0.887	0.863	0.865	0.880	0.876 0	0.890 0
Y 向	0.714	0.705	0.711	0.699	0.719	0.702 5	0.730 0
Z 向	2.677	2.702	2.688	2.695	2.710	2.681 0	2.773 0

将表 4 中优化前后的振动均值进行对比可以发现:利用优化后的参数进行试验,得到的振动平

均值均小于参数优化之前的均值,而对于划片机而言,极小的振动量都有可能造成划切质量的下降,从表中数据可以看出优化后的参数组合能够降低主轴振动量,进而减小由振动引起的划切质量的降低. 本文划切工艺参数优化方法可以为划切工艺参数选取提供真实可靠的理论指导.

4 结 论

1) 本文提出应用回归正交设计法建立划切工艺参数与设备振动量之间的回归方程,以较少的试验次数建立了砂轮划片机的划切工艺参数与振动特征量之间的准确函数关系.

2) 利用 Matlab 遗传算法对所建回归方程进行迭代优化,得出了对应最小振动量下的最佳工艺参数,避免了传统依靠经验确定工艺参数的不确定性.

3) 通过试验验证了此方法得到的最优加工工艺参数组合能够有效降低主轴振动量,对提高砂轮划片机划切精度具有一定的实际意义.

参考文献：

[1] 巩亚东,吕洋,王宛山,等. 基于多传感器融合的磨削砂轮钝化的智能监测[J]. 东北大学学报(自然科学版),2003,24(3):248-251.
(Gong Ya-dong,Lyu Yang,Wang Wan-shan,et al. Based on multi-sensor fusion of grinding wheel passivation of intelligent monitoring [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2003,24(3):248-251.)

[2] 闫伟文,高清勇. 划片机划切工艺研究[J]. 电子工业专用设备,2014(11):24-28.

(Yan Wei-wen,Gao Qing-yong. The research of dicing saw cutting technology[J]. *Journal of Electronic Industry Special Equipment*,2014(11):24-28.)

[3] Song T,Chen Z,He H,et al. Orthogonal design study on factors affecting the diameter of per fluorinated sulfonic acid nanofibers during electrospinning [J]. *Journal of Applied Polymer Science*,2015,132(14):41755.

[4] Branco P J C,Almeida M E,Dente J A. Investigations of the effects of blade type, dicing tape, blade preparation and process parameters on 55nm node low-k wafer [J]. *Proceedings of the IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*,2010,80(10):1-6.

[5] Li K,Guo Q,Zhao Y,et al. The study of the resin-bond diamond wheel for IC silicon wafer nanoscale roughness back grinding [J]. *International Conference on Information Science and Technology*,2011,26(5):1143-1147.

[6] Ismail M S,Moghavvemi M,Mahlia T M I. Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm [J]. *Energy Conversion and Management*,2013,73(9):10-25.

[7] Man K F,Tang K S,Kwong S. Genetic algorithms:concepts and design [J]. *Assembly Automation*,2013,4(1):826-835.

[8] Chan K Y,Kwong C K,Dillon T S. An enhanced genetic algorithm integrated with orthogonal design[J]. *Techniques for New Product Design*,2012,25(6):177-197.

[9] 李强,白基成,郭永丰,等. 基于遗传算法的往复走丝电火花多次切割加工参数优化[J]. 电加工与模具,2010(5):61-64,68.
(Li Qiang,Bai Ji-cheng,Guo Yong-feng,et al. Parameter optimization of multiple cutting process based on genetic algorithm for electric discharge machining of a reciprocating wire[J]. *Electromachining & Mould*,2010(5):61-64,68.)

[10] Lodha G M,Thakur M,Gaikwad R S. Search base software testing with genetic algorithm using fitness function [J]. *International Journal of Advanced Electronics and Communication Systems*,2014,3(1):19-28.