

文章编号: 1002-0411(2001)05-451-05

石墨电极研磨机主振台微圆周振动的实时监测与控制

周宏志 唐一平 李 乾 李涤尘 卢秉恒

(西安交通大学先进制造技术研究所 西安 710049)

摘要: 针对石墨电极研磨机主振台微圆周振动轨迹实时监测与控制的要求, 采用了双测头电涡流传感器分别检测主振台 X、Y 向的振动. 传感器标定数据的神经网络拟合方法保证了检测的精度. 通过对主振台相对于测头振动位移的实时测量, 可以得到主振台的微圆周振动动态振幅, 从而控制机床以保证研磨加工的顺利进行并为电火花加工钢模提供了平动头的振幅参数。

关键词: 研磨; 电涡流传感器; 圆周振动; 神经网络

中图分类号: TP13

文献标识码: B

A REAL-TIME MONITORING AND CONTROL METHOD FOR SMALL CIRCULAR VIBRATION ABOUT MAIN VIBRATION PLATFORM IN GRAPHITE ELECTRODE ABRADING MACHINE

ZHOU Hong-zhi TANG Yi-ping LI Qian LI Di-cheng LU Bing-heng

(Institute of AMT, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, P. R. China 710049)

Abstract: Pointing to the real-time monitoring and control of small-circular vibration of the main vibration platform in graphite electrode abrading machine, the vibration of the main vibration-platform in X, Y axis is detected by an eddy transducer with two probes. A neural network fitting method about calibration data of the transducer may guarantee the detecting accuracy. The small circular vibration dynamic amplitude of the main vibration amplitude on platform can be obtained through real-time vibration displacement measurement between the main vibration-platform and probes, and hence the machine is controlled to ensure the abrading process to be conducted smoothly, which could provide amplitude parameters for translation moving head in EDM process.

Keywords: abrading, eddy transducer, circular vibration, neural network

1 引言(Introduction)

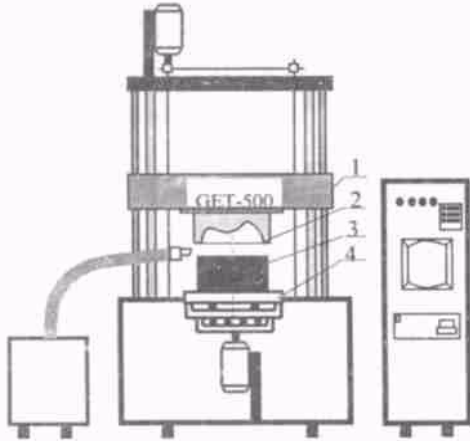
石墨电极研磨成形是一种非传统的快速制造整体电火花加工用石墨电极的机械加工方法, 也是 RP/RT 集成制造技术的一个重要组成部分^[1]. 石墨电极研磨机(简称研磨机)主要用于制造电火花加工用的石墨电极. 在研磨机的研磨加工过程中主振台在水平面内(XY 面)的微圆周平动振动作为研磨加工的主运动对研磨加工的精度、表面粗糙度和效率产生很大的影响. 研磨成形加工生产出表面形状与研磨研具相反但尺寸略小的石墨电极. 在电火花加工钢模时, 电火花机床的平动头需要采用与研磨机主振台相同的振幅参数, 以补偿石墨电极研磨加工过程中由于微圆周平动振动而缩小的尺寸^[2]. 另外,

研磨加工过程中过大的进给压力(Z 向)会使主振台和研磨研具之间的研磨加工阻力增加, 导致主振台和研磨研具之间“抱死”, 损坏主振台. 因此, 对研磨机主振台微圆周平动振动的实时监测与控制是保证机器安全和提高钢模质量的关键.

2 石墨电极研磨机成形原理(Shaping principle of graphite electrode abrading)

研磨机成形原理如图 1 所示. 待加工石墨块 3 安装在主振台 4 上, 主振台带动石墨块作微小圆周平动运动, 研具 2 安装在进给台 1 上, 研具可在进给台带动下沿 Z 轴向下移动, 实现进给. 先通过快速原型或样件复制研具, 研具由磨料和粘结剂固化成

形后,将研具和石墨块安装在研磨机上,在研磨加工时,研具向下缓慢进给,逐渐磨去作圆周平动的石墨块上的多余石墨材料,直到最后形成与研具内腔表面相反的石墨电极.电火花加工后的石墨电极有一定的损耗,可将它重新装夹在研磨机上再加工,作进一步的研磨即可修复好电极.石墨电极研磨机主要用于电火花加工用石墨电极的成形及其修复.



1 进给台 2 研具 3 石墨块 4 主振台
图1 石墨电极研磨成形机组成

Fig.1 Structure of GEA

3 主振台振动实时监测与闭环控制系统 (Real-time monitoring and closed-loop control system of main vibration-platform)

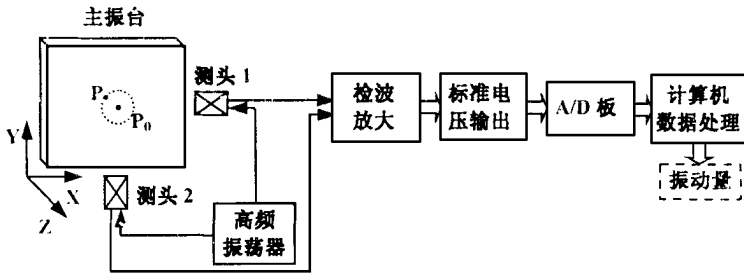


图2 主振台振动实时监测系统

Fig.2 Real-time monitoring system of main vibration-platform

在研磨加工实际加工过程中,由于加工阻力的影响主振台上质点的运动轨迹可能偏离(2)式所示的圆周轨迹.严重的偏离可能导致振动台主轴的损毁.因此有必要对研磨机主振台的振动进行实时监控,确保研磨加工的顺利进行.在主振台振动实时监测系统中我们采用一个双测头电涡流传感器分别监测主振台X、Y向的动态振动 δ_x, δ_y , (d_x, d_y 实时振动量分别用 δ_x, δ_y 表示).两个传感器的测头如图2所示垂直安置,则质点 $P(x, y)$ 相对于 $P_0(x_0, y_0)$ 的动态振幅 δ_d 为:

$$\delta_d = (\delta_x^2 + \delta_y^2)^{1/2} \quad (3)$$

control system of main vibration-platform)

主振台振动实时监测系统如图2所示.理论上,主振台在XY平面内作微小的圆周平动振动,因此在任意时刻主振台上各点的运动轨迹均是相同的.假定微圆周的直径为 d ,振动频率为 f ,则在图示坐标系中在某一时刻 t 时主振台上某一质点 $P(x, y)$ 的运动方程可表示为:

$$\begin{cases} x = x_0 + \frac{d}{2} \sin(2\pi ft + \varphi) \\ y = y_0 + \frac{d}{2} \cos(2\pi ft + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

其中, φ 为振动开始时的初始相位角, $P_0(x_0, y_0)$ 为质点 $P(x, y)$ 微圆周振动的中心点,我们假定这一点在加工过程中是固定不变的.因此,质点 $P(x, y)$ 相对于微圆周振动的中心 $P_0(x_0, y_0)$ 的振动运动方程可表示为:

$$\begin{cases} d_x = x - x_0 = \frac{d}{2} \sin(2\pi ft + \varphi) \\ d_y = y - y_0 = \frac{d}{2} \cos(2\pi ft + \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

其中, d_x, d_y 分别表示在X、Y向 P 相对于 P_0 的位移.

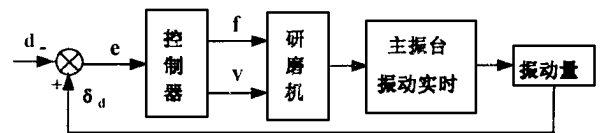


图3 主振台振动监测与控制闭环系统

Fig.3 Real-time monitoring and closed-loop control system of main vibration-platform

在研磨加工过程中,如果振幅安全裕量为 ϵ ,期望的微圆周振动直径为 d ,则质点相对振动轨迹在图4所示的带状区域内振动机床的运行是安全的. δ_d 为 P 到 P_0 的实际距离,取 $e = \delta_d - d$,当 $|e| < \epsilon$ 时振动研磨加工是安全的,超出这个范围就应采取措

施以保证机床的安全运行. 从实际经验可知, 影响主振台振幅变化的主要因素是主振台的振动频率 f 和研磨加工时的工进速度 v . 因此, 当主振台振动超出安全加工范围时, 研磨机的控制计算机将发出指令调整以上两参数, 使主振台振动回到安全加工范围. 主振台振动监测与控制闭环系统如图 3 所示.

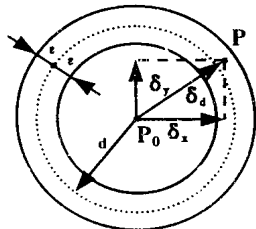


图 4 质点振动示意图

Fig. 4 Sketch map of particle vibration

4 主振台振幅的测量与控制 (Measuring and control of main vibration amplitude)

振动位移采用 SJ-4 型电涡流传感器进行测量. 电涡流传感器基于电涡流效应, 当金属导体中的磁通发生变化时, 就会在导体中产生感应的电涡流, 电涡流的产生必然要消耗一部分磁场能量, 使产生磁场的线圈阻抗发生变化, 从而引起输出电压的变化. 但是, 输出电压与振动物体的相对位移之间存在着严重的非线性, 为了提高拟合精度, 必须作非线性数据处理.

4.1 电涡流传感器标定

BP 神经网络是由三层或三层以上神经元构成的非线性系统, 有很强的非线性映射能力. 因此, 采用 BP 神经网络来拟合电涡流传感器的标定值. 用 u 表示电涡流传感器输出电压, δ 表示主振台相对于测头的振动位移, 三层神经网络的输入输出映射关系如下.

(1) 层节点输出 $O_1 = u_k \quad k = 1, 2, \dots, r$ r 为训练数据 (u_k, δ_k) 的对数

(2) 层节点输入 $I_2j = \omega_{2j} O_1 \quad j = 1, 2, \dots, n$ n 为节点数

输出 $O_2j = f(I_2j + b_j)$ 节点变换函数为 sigmoid 函数, b_j 为节点阈值

(3) 层节点输入 $I_3 = \sum_{j=1}^n \omega_{3j} O_2j$

输出 $\hat{\delta}_k = I_3 + b$ 节点变换函数为线性函数, b 为节点阈值

由上可知, 神经网络的输入输出关系为:

$$\hat{\delta}_k = \sum_{j=1}^n \omega_{3j} f(\omega_{2j} u_k + b_j) + b \quad k = 1, 2, \dots, r \quad (4)$$

定义学习的误差函数为:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r (\delta_k - \hat{\delta}_k)^2 \quad (5)$$

在研磨加工前, 通过实验测得电涡流传感器的位移-电压对应值如表 1 所示, 将这些实验数据记录下来, 作为传感器的标定数据.

表 1 实验测量数据

Tab. 1 Measuring data of experiment

| 位移 δ (mm) | 电压 u (V) | 位移 δ (mm) | 电压 u (V) | 位移 δ (mm) | 电压 u (V) | 位移 δ (mm) | 电压 u (V) |
|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| 0 | 9.96 | 1.0 | 6.15 | 2.0 | 0.76 | 3.0 | - 5.54 |
| 0.1 | 9.64 | 1.1 | 5.67 | 2.1 | 0.16 | 3.1 | - 6.22 |
| 0.2 | 9.32 | 1.2 | 5.19 | 2.2 | - 0.43 | 3.2 | - 6.86 |
| 0.3 | 8.98 | 1.3 | 4.68 | 2.3 | - 1.05 | 3.3 | - 7.53 |
| 0.4 | 8.6 | 1.4 | 4.14 | 2.4 | - 1.66 | 3.4 | - 8.16 |
| 0.5 | 8.24 | 1.5 | 3.62 | 2.5 | - 2.3 | 3.5 | - 8.83 |
| 0.6 | 7.85 | 1.6 | 3.08 | 2.6 | - 2.94 | 3.6 | - 9.48 |
| 0.7 | 7.43 | 1.7 | 2.5 | 2.7 | - 3.58 | 3.7 | - 9.98 |
| 0.8 | 7.06 | 1.8 | 1.95 | 2.8 | - 4.25 | | |
| 0.9 | 6.6 | 1.9 | 1.36 | 2.9 | - 4.88 | | |

采用梯度下降学习算法训练神经网络, 第二层节点数为 7, 训练数据如图 5(a) 所示, 经过 48 万次训练后, 拟合曲线如图 5(b) 所示, 误差 $E < 0.002$.

将训练好的神经网络的节点权值和阈值保存下来, 在研磨加工时计算机实时采集电涡流传感器的输出电压, 由公式(4)即可计算得到实时的主振台位

移.

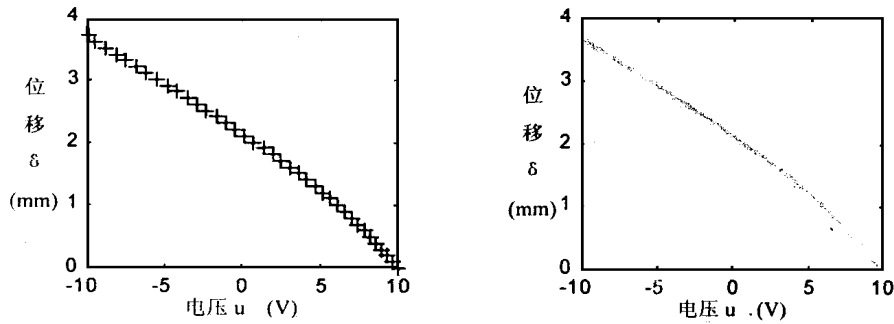


图5 神经网络训练数据及拟合曲线

Fig. 5 Training data and fit curve of neural network

4.2 主振台振幅的检测结果

在研磨加工过程中, 计算机实时采集主振台与电涡流传感器两测头之间在同一时刻的相对位移. 由于测头 1, 2 垂直安置分别检测主振台在 X、Y 向的振动, 因此主振台上的质点相对于其运动中心的振幅即可确定. 图 6(a)(b) 为某一时段计算机实时

采集的主振台与电涡流传感器两测头之间的相对位移. 图 7 为此时段主振台动态振幅. 研磨机根据主振台动态振幅与期望的微圆周平动直径的差值 $e(e = \delta_d - d)$ 调整主振台的振动频率 f 和研磨机工进速度 v , 确保研磨加工的安全运行.

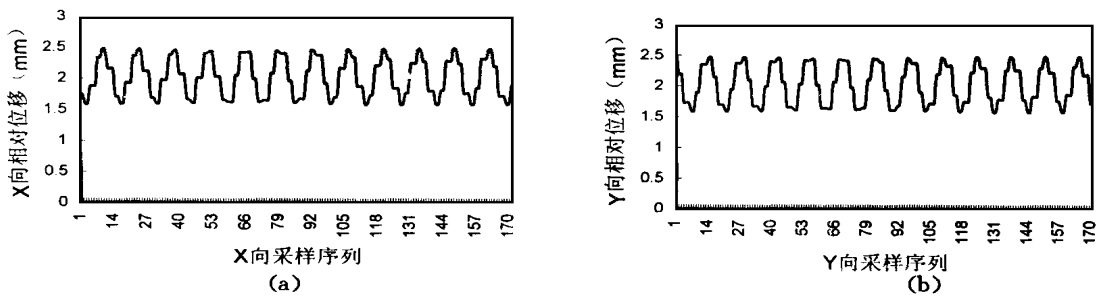


图6 主振台与电涡流传感器测头的相对位移

Fig. 6 Relative displacement between main vibration platform and eddy transducer

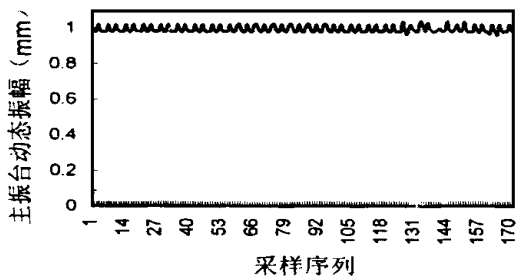


图7 主振台动态振幅

Fig. 7 Dynam ic amplitude of main vibration platform

4.3 主振台振幅的参数调整控制系统

为了将主振台的振幅控制在一定的范围内, 研磨机控制系统需要动态调整主振台的振动频率 f 和研磨加工时的工进速度 v . 为了使系统满足一定的精度要求, 又使其动态响应满足一定的品质指标

要求, 主振台振幅的调整控制方式采用 PID 控制. 其控制算法为:

$$U_k = K_p [e_k + K_i \sum_{i=1}^k e_i + K_d (e_k - e_{k-1})] \quad (6)$$

$$e_k = \delta_d - d \quad (7)$$

式中 $U_k = \begin{bmatrix} f_k \\ v_k \end{bmatrix}$ 为控制变量, $K_p = \begin{bmatrix} K_{pf} \\ K_{pv} \end{bmatrix}$, $K_i = \begin{bmatrix} K_{if} \\ K_{iv} \end{bmatrix}$, $K_d = \begin{bmatrix} K_{df} \\ K_{dv} \end{bmatrix}$ 为 PID 控制的比例、积分和微分系数, 其值由实验确定.

因此,

$$\Delta U_k = U_k - U_{k-1} = K_p [(e_k - e_{k-1}) + K_i (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2})] \quad (8)$$

式中 $\Delta U_k = \left| \frac{\Delta f_k}{\Delta v_k} \right|$ 为振动频率 f 和研磨加工时的工进速度 v 的改变量. 研磨机控制系统根据采集到的动态振幅 δ_d 与期望的微圆周平动直径 d 的差值 e , 由(8)式计算即可得到研磨加工参数 f 、 v 的调整量, 从而调整机床确保振动量在一定范围内变化.

5 结束语(Conclusion)

计算机实时采集主振台相对于电涡流传感器两侧头之间同一时刻的相对位移, 实现实时监测主振台平动振动, 从而保证研磨加工的顺利进行. 平动振动振幅参数提供给电火花加工机床, 以补偿加工钢模时由于石墨电极平动振动加工而缩小的尺寸, 提高钢模的加工精度. 实际的加工生产证明此方法是必要的而且是可行的.

参 考 文 献 (References)

- 1 卢秉恒, 唐一平, 李涤尘. 激光快速成型制造的发展和应. 全国高等学校机床学研究会会议论文, 1996, 56~ 72
 - 2 Zhou Hongzhi, Tang Yiping, Guo Jiusheng, Lu Bingheng. Abrading Technique Research on the Whole-bodied Graphite EDM Electrode Based on Rapid Prototyping Technology. ICAMT'99, 126~ 129
 - 3 CRYALL. Rapid EDM Electrodes: Linking Rapid Prototyping to High Volume Production. Rapid Prototyping Report, 211~ 220, 1996
 - 4 孙玉声. 振动传感器. 陕西: 西安交通大学出版社, 1991
- (上接第 439 页)
- 24 Sun F C, Sun Z Q et al. An Adaptive Fuzzy Controller Based on Sliding Mode for Robot Manipulators, IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 1999, **29**(4): 661~ 667
 - 25 Xu H B, Sun F C et al. The Adaptive Sliding Mode Control Based on a Fuzzy Neural Networks for Manipulators, Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, 1996, 3: 1942~ 1946
 - 26 Wai R J, Lin F J. Fuzzy Neural Network Sliding-Mode Position Controller for Induction Servo Motor Drive, IEE Proc., Electronics Power Application, 1999, **146**(3): 297~ 308
 - 27 Tamai Y J, Akhmetov D et al. Novel Fuzzy-Neural Network With General Parameter Learning Applied to Sliding Mode Control Systems, Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, 1999, 1: 376~ 379
 - 28 Hwang K S, Lin C S. Self-Organizing Fuzzy CMAC for Sliding Mode Control, Proc. of IEEE Int. Workshop on Variable Structure Control, 1996, 133~ 138
 - 29 Lin F J, Hwang W J et al. A Supervisory Fuzzy Neural Network Control System for Tracking Periodic Inputs, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 1999, **7**(1): 41~ 52
 - 30 达飞鹏, 宋文忠. 基于模糊神经网络的滑模控制, 控制理论与应用, 2000, **17**(1): 128~ 132
 - 31 Liu T H, Lin M T. A Fuzzy Sliding-Mode Controller Design for a Synchronous Reluctance Motor Drive, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 1996, **32**(3): 1065~ 1076
 - 32 Park D W, Choi S B. Moving Sliding Surfaces for High Order Variable Structure Systems, Int. Jour. of Control, 1999, **72**(11): 960~ 970
 - 33 Wong L K, Leung F H F et al. Combination of Sliding Mode Controller and PI Controller Using Fuzzy Logic Controller, Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, 1998, 1: 296~ 301
 - 34 Kung C C, Kao W J. GA-Based Grey Fuzzy Dynamic Sliding Mode Controller Design. Proc. of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, 1998, 1: 583~ 588
 - 35 Yoon B D, Kim Y H. Robust Control of Induction Motor Using Fuzzy Sliding Adaptive Controller with Sliding Mode Torque Observer, IECON Proc., 1995, 1: 518~ 523

作者简介

周宏志(1972-), 男, 西安交通大学机械学院先进制造技术研究所博士研究生. 研究领域为模具制造、数控加工和智能控制方向的研究.

唐一平(1946-), 男, 西安交通大学机械学院副教授.

李 乾(1976-), 男, 西安交通大学先进制造技术研究所硕士研究生. 研究领域为先进制造.

作者简介

傅 春(1973-), 男, 博士生. 研究领域为模糊滑模控制.

谢剑英(1940-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域为复杂工业过程智能和优化控制、计算机网络等.