

小波变换在伺服焊枪电极位移曲线分析中的应用

王华，张延松，陈关龙

(上海交通大学 机械与动力工程学院 车身制造技术中心 上海 200030)

摘要：电极位移曲线能够反映出点焊规范参数波动，是一个理想的监控参数。采用离散 Daubechies 4 阶小波对电极位移曲线进行滤波处理，成功地将测量曲线分为电极位移趋势曲线、波动曲线。这两种曲线分别反映了点焊质量的整体质量优劣、过程一致性这两方面特征，提高了位移曲线表征焊接过程的能力，为伺服焊枪的点焊质量控制提供了准确、优良的数据基础。

关键词：伺服焊枪；电极位移；小波变换

中图分类号：TG 441.7 文献标识码：A 文章编号：0253-360X(2005)12-21-04



王华

0 序言

伺服焊枪是最近发展起来的一种新型点焊设备，采用伺服电机作为动力装置，精确控制电极位移与电极力，由伺服控制器实现对伺服电机的高效、准确控制，易于与机器人控制器接口有效集成，从而实现对点焊电极的高精度定位与柔性焊接控制。在焊枪的发展里程上相当于机床行业由普通机床到数控机床的飞跃。

热膨胀法是利用被焊金属在加热熔化时体积发生迅速膨胀，并使电极产生位移这一现象，利用该位移信号作为点焊质量控制的参数，这就是常说的“热膨胀电极位移法”^[1~3]。由于热膨胀直接反映了熔核的产生及发育情况，同时热膨胀位移与焊点尺寸有着良好的对应关系，因而一直受到国内外学者的关注，并取得了众多的研究成果。

电极位移曲线能够反映出点焊规范参数波动，是一个理想的监控参数，并随着不同厚度、不同材料的工件和焊接规范的变化，对应的电极位移曲线都不同。同时，电极位移的测量总会有一定的实际条件和其它不确定性影响因素。因此，采样的位移曲线必然是实际位移和随机误差的耦合体，在实际点焊质量控制过程中，需要对电极位移曲线进行噪声滤除。

小波分析以其良好的时频局部性，成为时频分析方法中发展最为迅速的一种。小波变换是分析非平稳信号的基本工具之一，具有多分辨表示瞬态信

号的能力以及具有良好局域化特性与逼近性，已经广泛用于分析各种短时瞬态信号、非平稳过程信号、含宽带噪声信号等。文中使用离散 Daubechies 4 阶小波对电极位移曲线进行测量噪声的滤除，提高位移曲线表征焊接过程的能力，为伺服焊枪的点焊质量控制提供准确的数据。

1 电极位移曲线

和常规的气动焊枪相比，伺服焊枪可搭配在机器人上，作为机器人的第七轴，靠机器人来控制。伺服焊枪是由伺服电机驱动，这就可以对焊接过程进行精确控制。伺服焊枪的电极运动由伺服马达控制，能够很好地控制电极运动速率，电极与工件接触时的冲击很小。伺服电机转矩和速度作为电机控制器的输出量，其变化量可以容易地转变为电极力和电极位置的变化，并且使电极力和电极位移信号的在线实时监控成为可能。电极位置、在线失效探测和电极补偿的准确测量也就变得比气动焊机更容易。同时又能保证电极压力在点焊过程中的恒定。基于伺服焊枪的优点，可以很好地解决传统的采集位移曲线时所遇到的困难，为电极位移的正确获取提供可能。

由于点焊过程时间很短，一般在 0.2 s 即完成一个完整的点焊过程。因此，对传感器的精度提出了很高的要求。文中采用 OMRON 的非接触式激光位移传感器，响应时间 0.3 ms，分辨率 0.25 μm，符合点焊过程中位移曲线获取的需要，传感器如图 1 所示。



图 1 激光位移传感器

Fig. 1 Laser sensors

在完成伺服焊枪试验系统和软硬件设计的基础上进行电极位移曲线采集。焊接电流和焊接时间由焊接控制器控制程序确定, 焊接次级电流由 M IYACHI 公司 MM - 315AC 便携式测量仪标定, 伺服焊枪的电极压力用 SPOTRAN 便携式测量仪标定, 以 ST1203 普通等厚 1.5 mm + 1.5 mm 低碳钢板为例, 焊接电流 8200 A, 电极压力 3000 N, 焊接时间 8 cycle, 采用锥台型电极, 电极直径 6.4 mm, 采集程序每半波采集 10 个点。位移传感器安装如图 2 所示, 电极位移曲线如图 3 所示。从电极位移曲线上, 可以明显看出在焊接过程中的曲线波动, 这其中包含着焊接过程的波动和随机测量误差。直接使用原始的电极位移曲线进行点焊质量控制有很大的难度。

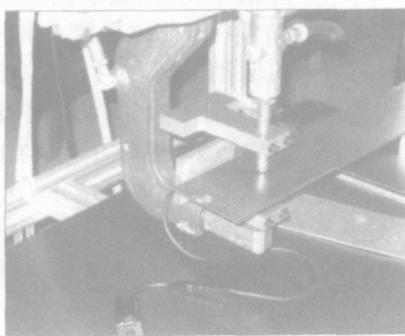


图 2 传感器的安装方案

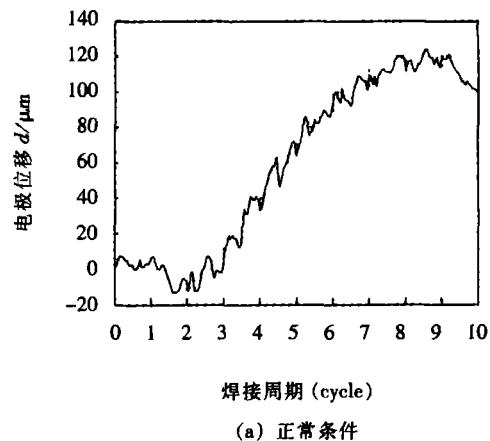
Fig. 2 Setup of sensors

2 电极位移曲线的小波分析

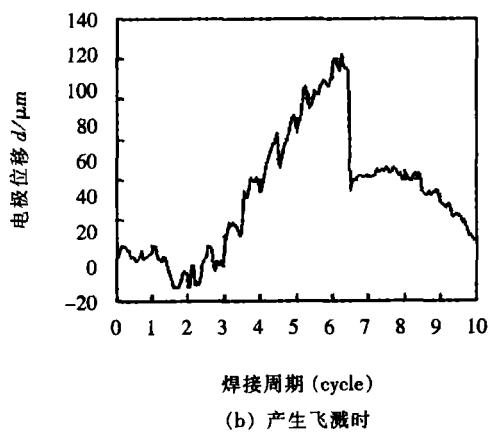
2.1 小波分析基本原理

在实际应用中, 特别是在计算机实现上, 经常使用的是二进小波和二进小波变换。

定义 1 函数 ψ 被称为是一个二进小波, 若存在二常数 A, B ($0 < A \leq B < \infty$), 使得:



(a) 正常条件



(b) 产生飞溅时

图 3 电极位移曲线

Fig. 3 Displacement curve

$$A \leq \sum_{k \in \mathbb{Z}} |\psi(2^{-k} \omega)|^2 \leq B. \quad (1)$$

式 (1) 被称为稳定性条件。若 $A = B$, 则称为最稳定条件。

定义 2 序列 $\{b_{jk}\}$ 叫做 f 的二进小波变换, 其中

$$b_{jk} = f^* \psi_j = \int_R f(t) \psi_j(2^j t - k) dt \quad (2)$$

假设尺度函数 $\phi(t)$ 在平移的同时又进行了尺度的伸缩, 得到如下函数集合:

$$\phi_{jk}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k) = \phi_k(2^j t). \quad (3)$$

称每一固定尺度 j 上的平移系列 $\phi_k(2^j t)$ 所张成的空间 V_j 为尺度 j 的尺度空间:

$$V_j = \text{span} \{ \phi_k(2^j t) \}, k \in \mathbb{Z}. \quad (4)$$

对任意函数 $f(t) \in V_j$, 有

$$f(t) = \sum_k a_k \phi_k(2^j t) = 2^{j/2} \sum_k a_k \phi(2^j t - k). \quad (5)$$

尺度函数 $\phi(t)$ 在不同尺度下其平移系列张成了一系列的尺度空间 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 。由式 (3), 随着尺度 j 的增大, 函数 $\phi_{jk}(t)$ 的定义域变大, 而实际的平移间隔 ($2^j \Delta \tau$) 也变大, 则它的线性组合式 (5) 不能表示

函数(小于该尺度)的细微变化。因此其张成的尺度空间只能包括大尺度的缓变信号。相反, 随着尺度 j 的减小, 函数 $\phi_{jk(t)}$ 的定义域变小, 而实际的平移间隔($2^j \Delta t$)也变小, 则它的线性组合式(5)便能表示函数的更细微(小尺度范围)变化。因此其张成的尺度空间所包含的函数增多, 尺度空间变大。 j 就是通常所说的分离层数。

根据多尺度分析^[4], 对于任意函数 $f(t)$, 可将它分解为细节部分 W_1 和大尺度逼近部分 V_1 , 然后将 V_1 进一步分解。如此重复, 就可以得到任意尺度(或分辨率)上的逼近部分和细节部分, 这就是多尺度分析的框架。

2.2 Daubechies 小波

文献[5]构造了一类小波 $\psi(t)$, 这类小波是从尺度函数 $\phi(t)$ 得出的, 而 $\phi(t)$ 又是下列差分等式的解:

$$\phi(t) = \sum_k C_k \phi(2t - k). \quad (6)$$

在这个等式中, 尺度参数是 2 偏移变量是 k 如果系数系列 $\{C_k\}$ 是有限长度的, 则小波函数 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\phi(t)$ 是紧支撑的。

尺度系数 $\{C_k\}_{k=0}^{N-1}$ 满足下列条件。

$$\text{正则条件: } \sum_{k=0}^{N-1} C_k = \sqrt{2}, \quad (7)$$

$$\text{正交条件: } \sum_{k=0}^{N-1} C_k C_{k-2m} = 2 \delta_m, \quad (8)$$

式中: δ_m 是离散 Dirac Delta 函数

$$\text{消失矩条件: } \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k k^m C_k = 0 \quad (m = 0, 1, \dots, p-1, p < N) \quad (9)$$

正则条件保证了尺度函数 $\phi(t)$ 定义了一个低通滤波器, 消失矩条件必须在 $p=1$ 时才能成立, 以保证尺度上所有偏移构成 $L^2(R)$ 的一个正交基。

小波从序列 $\{C_k\}$ 构造出来, 即

$$d_k = (-1)^k C_{1-k}, \quad (10)$$

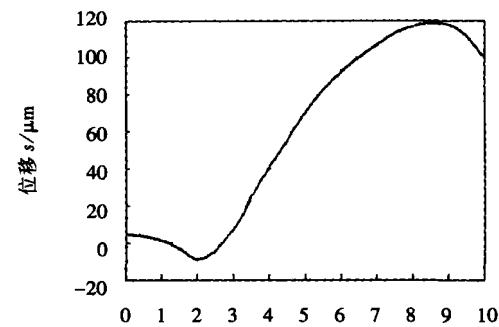
$$\psi(t) = \sum_k (-1)^k k^m \phi(2t - 1). \quad (11)$$

$\{d_k\}$ 称为小波系数, 它定义了一个带通滤波器。

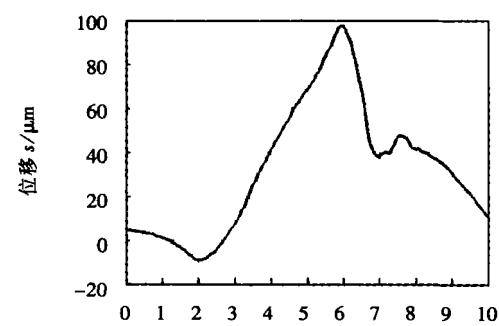
满足式(6)~(11)的紧支撑小波称为 Daubechies 小波, 记为 D_p , 其中 $p=1, 2, \dots$, 下标 p 是消失矩的数目, $N=2p$; N 表示在离散小波变换中相应 Daubechies 小波系数的最小非零数目。

2.3 电极位移曲线的小波分析

采用 Daubechies 4 阶小波^[5]对电极位移趋势曲线进行 4 层滤波处理, 得到滤波后的电极位移曲线(图 4)和位移波动曲线(图 5), 效果十分理想。



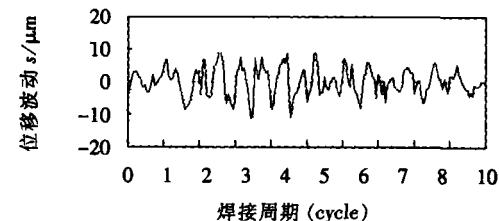
(a) 正常条件



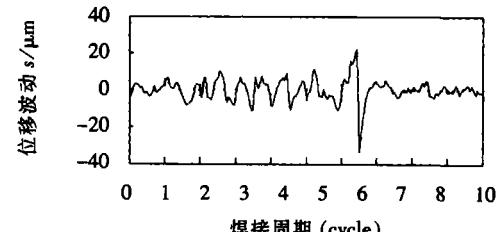
(b) 产生飞溅时

图 4 小波滤波后的电极位移趋势曲线

Fig. 4 Displacement trend curve after wavelet filtering



(a) 正常条件



(b) 产生飞溅时

图 5 小波滤波后电极位移波动曲线

Fig. 5 Variation of displacement after wavelet filtering

合适的焊接工艺参数是获得优质焊接接头的重要条件。点焊规范参数的选取主要取决于金属材料

的性质、板厚及所用设备的特点,对于常用的工频交流点焊主要的规范参数有:焊接电流、焊接时间、电极压力等。点焊时合理地选择这些参数并使其保持稳定对保证焊接质量具有十分重要的作用。点焊质量的好坏,可以通过电极位移曲线进行评价与判断。

采用小波方法将直接测量的电极位移曲线分离为电极位移趋势曲线、位移波动曲线,这两种曲线分别反映了点焊质量的不同方面。利用电极位移趋势曲线的曲线特征,如:波形、斜率、极差等指标能够直接判断点焊质量的好坏,以及点焊过程中正常焊接、飞溅等情况(图 4a b)。

而对于电极位移波动曲线,它反映了点焊过程的稳定性、一致性。理想条件下的电极位移波动曲线是平稳随机过程,异常条件下的电极位移波动曲线将会表现出不同的特性(图 5a b),这些特性可以采用时间序列方法、时频分析方法以及统计过程控制中的控制图等方法进行后续处理与分析,达到控制点焊质量的目的。

3 分析案例

在焊接过程中,电极在压力作用下频繁地与工件接触、通电、发热甚至飞溅,电极端部容易污损和发生塑性变形,降低焊点的电流密度,导致形成焊点所需热量减少,焊接质量(如熔核尺寸)和焊点外观质量无法保证。随着镀锌钢板、铝合金板等轻量化材料逐渐在车身生产线上的广泛应用,锌层与铜电极的合金化作用致使电极磨损更加剧烈。考虑电极磨损是一个瞬态的渐变过程,在一定的焊点数量范围内其磨损状态很难清楚界定,采样数据如图 6 所示。

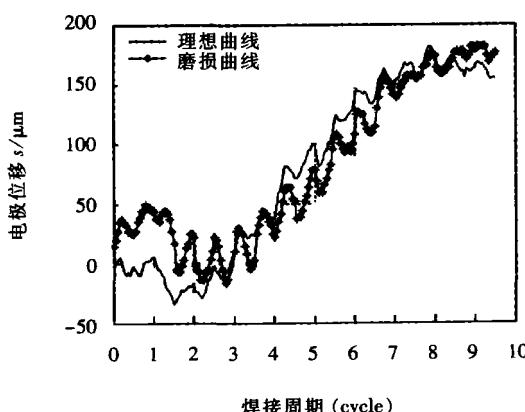


图 6 不同焊接条件下的电极位移曲线

Fig 6 Displacement curves with different welding conditions

采用小波滤波后,可以很明显地区分两条电极位移曲线(图 7)。当电极磨损时,由于电极端面直径变大,电极与工件之间的接触面积增大,使点焊过程中流过的电流密度减小,使实际的电极位移低于正常状态的电极位移曲线。

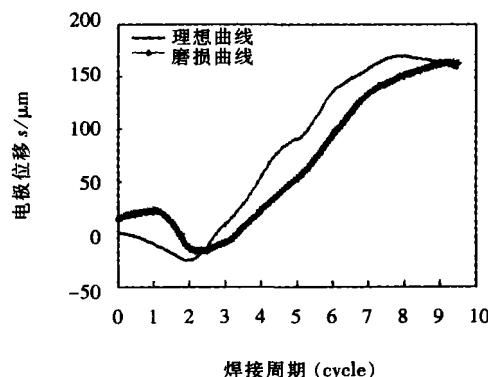


图 7 小波滤波后不同焊接条件下的电极位移曲线

Fig 7 Displacement curves after wavelet filtering with different welding conditions

4 结 论

(1) 电极位移曲线能够反映出点焊工艺参数波动,是一个理想的点焊质量监控参数。在实际应用过程中,电极位移的测量曲线是实际位移和随机误差的耦合体,在实际点焊质量控制过程中,需要对电极位移曲线进行噪声滤除。

(2) 利用作者提出的小波滤波方法结合电极位移热膨胀曲线可很好地分离电极位移曲线,提高了位移曲线表征焊接过程的能力,为伺服焊枪的点焊质量控制提供了准确、优良的数据基础。

参考文献:

- [1] 曹彪,姜以宏,王建一.点焊熔核形成过程的有限元模型[J].机械工程学报,1995,31(2):99-104
- [2] 姜以宏,高洪明,叶广郁.铝合金点焊热膨胀电极位移法质量实时控制的研究[J].焊接,1995,(3):7-11
- [3] 常云龙,黄石生,余文松,等.热膨胀电极位移法用于机器人点焊过程的研究[J].机器人,1999,21(2):135-138
- [4] Mallat S. Multiresolution approximations and wavelet orthogonal bases of $L^2(R)$ [J]. Trans of American Mathematical Society 1989, 315(1): 69-87
- [5] Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia PA, 1992

作者简介: 王华,男,1975年11月生,博士,讲师。主要从事车身焊装质量控制、检测信号分析、小样本方法等研究。发表论文10余篇。

E-mail huawang@sjtu.edu.cn

space and time was obtained. The calculated results were validated by measuring the actual temperature of characteristic positions.

Key words numerical simulation; thermal transfer model; temperature field; load step; ANSYS; moving coordinate system

Wavelet analysis in servo-gun electrode displacement measurement and welding quality control WANG Hua¹, ZHANG Yan song², CHEN Guan-long¹ (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p21-24

Abstract Electrode displacement curve is an ideal parameter for servo gun resistance spot welding (RSW) quality control. Electrode displacement curve was separated into trend curve and variation curve by wavelet analysis. Trend curve reflected whole quality of the RSW and variation curve reflected process consistency of the RSW. Electrode displacement curve after wavelet analysis provided good data groundwork for servo gun RSW quality control.

Key words servo gun; electrode displacement; wavelet analysis

Study on micro mechanism for macro micro manipulator

ZHANG Guo-xian¹, CHEN Qiang¹, ZHANG Wen-zeng¹, Tang Xiao-hua¹ (Dept. of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). p25-28

Abstract In order to improve the high speed control capacity of an industrial robot and enlarge its applications in laser welding and cutting, a 3 degree of freedom micro mechanism for macro micro manipulator was proposed. The micro mechanism structure was analyzed by comparing different kinds of moving forms. Kinematics equation was established and mechanics characteristic was optimized. The micro mechanism is compact weighting only 1 kg with a load capacity more than 3 kg and a precision higher than 0.04 mm, meeting the demand of high precision manufacturing.

Key words industrial robot; macro micro manipulator; micro mechanism; trajectory precision

Diffusion bonding of Ti6Al4V to ZQSn10-10 with a copper Interlayer SONG Min-xia¹, ZHAO Xi-hua¹, GUO Wei¹, FENG Ji-cai² (1 College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2 National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p29-31, 38

Abstract The experimental investigation of the diffusion bonding of titanium alloy (Ti6Al4V) to Tin bronze (ZQSn10-10) in vacuum was carried out by using pure copper as the transition metal. The microstructure of the joints was studied by SEM, EDS etc. and their mechanical

properties were tested by tensile experiments. Experimental results show that using copper as interlayer it can not only avoid some elements (Sn, Pb etc.) volatilizing but also prevent unwanted elements from diffusion. So the properties of joint can be improved by avoiding more intermetallic compound. The bonding of ZQSn10-10 to copper as interlayer metal is well formed which intergradation zone can not obviously developed but the intergradation zone well develop between copper and titanium alloy which intermetallic compound Cu₃Ti₂ concomitantly appear. The optimum bonding parameters were: bonding temperature $T=850^{\circ}\text{C}$, bonding pressure $P=10\sim15\text{ MPa}$ and bonding time $t=30\text{ min}$. So the strength of the joint without obvious shape change was up to 192M Pa reaching to about 80% of the strength of base metal ZQSn10-10.

Key words titanium alloy; Tin bronze; diffusion bonding; copper interlayer; intermetallic compound

Adaptive fuzzy controller based on variable universe for seam tracking YE Jian-xiong¹, ZHANG Hua¹, YANG Wu-qiang² (1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China; 2. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China). p32-34

Abstract Aiming at the problem that the precision and the self-adaption are not very well for the pure fuzzy controller in seam tracking of the welding robot, an adaptive fuzzy controller that the universe can be adjusted automatically were designed in this paper. The controller uses the windage and the speed of the windage variation as inputs, and adjusts the universe through the value of windage and windage variation. It can improve the precision and robustness of fuzzy controller. A satisfied effect are gotten by simulation.

Key words variable universe; fuzzy controller; self adaption simulation

Effect of tool tilt angle on formation and mechanical property of FSW YAN Keng¹, CAO Liang¹, CHEN Huabin², (1 Provincial key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China; 2 Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p35-38

Abstract The effect of the tool tilt angle on the characteristics of LF5 aluminum alloy by friction stir welding such as the material flow and mechanical property was introduced. Tunnel defect is observed at 0.5 mm below the tool shoulder as the tilt angle θ is less than 1.5° . Material at lower portion of nugget is deposited. With the increase of θ , deformation and material flow of nugget become more serious, the nugget becomes wider and the defect disappears gradually. When θ is 2° , kissing bond was found in the upper region through the observation of fracture by SEM. If θ