

● 焊接技术 ●

基于旋转电弧填丝 TIG 焊焊缝跟踪信号处理研究

贾剑平, 艾十雄, 王 鑫, 叶艳辉

(南昌大学 江西省机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031)

摘 要: 设计了旋转电弧 TIG 焊接焊缝跟踪系统, 将旋转电弧传感器应用于 TIG 焊接, 利用旋转电弧扫描焊缝, 通过采集、处理焊接电压的变化实现焊缝的跟踪。对实际焊接电压信号进行了分析, 提出了数字滤波器和小波滤波器相结合的方法, 建立了旋转电弧 TIG 焊接电弧高度与电压的模型。试验结果表明, 设计的滤波算法实用性好, 可靠性高, 能有效地识别旋转电弧填丝 TIG 焊接高度的变化, 为焊缝跟踪打下基础。

关键词: 旋转电弧; TIG 焊接; 焊接电压; 滤波

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.19.031

中图分类号: TG409

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2019)19-0124-04

Research on Weld Seam Tracking Signal Processing Based on Rotating Arc Filling TIG Welding

JIA Jianping, AI Shixiong, WANG Xin, YE Yanhui

(Jiangxi Key Laboratory of Robotics and Welding Automation, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: A rotating arc TIG welding seam tracking system was designed. The rotating arc sensor was applied to TIG welding, and the welding seam was scanned by rotating arc. The welding seam tracking was realized by collecting and processing the change of welding voltage. The actual welding voltage signal was analyzed. The method combining digital filter with wavelet filter was put forward, and the model of arc height and voltage of rotating arc TIG welding was established. The experimental results show that the designed filtering algorithm has good practicability and high reliability. It can effectively identify the change of the rotating arc filling TIG welding height and lay a foundation for the seam tracking.

Key words: rotary arc; TIG welding; welding voltage; filtering

焊接技术在工业制造中扮演了很重要的角色, 随着科技的发展, 各种先进的焊接技术、焊接方法不断涌现, 焊接技术很大程度上反映了一个国家的工业水平。计算机科学、新型传感器和新型焊接电源等的发展给焊接自动化带来了活力, 随着人工智能和现代制造业技术的发展, 焊接自动化已成为必然趋势^[1]。

钨极氩弧焊(TIG 焊)由于有电弧稳定、焊接质量好以及可以焊接几乎所有合金或金属等优点, 广泛地运用于航空、车辆、船舶和核工业等各个领域。当然 TIG 焊有焊接速度慢、焊接熔深浅和熔敷效率低等缺点, 故运用范围受到了限制。近年来, 一些新型的 TIG 焊接技术逐步出现, 给 TIG 焊创造了新的发展机遇, 如活性钨极氩弧焊、热丝 TIG 焊、窄间隙

TIG 焊和 TIP-TOP 焊等^[2]。旋转电弧传感器由于有不受弧光、磁场干扰, 实时性和可达性好等优点得到了迅猛发展。洪波等人研制出了一种磁控电弧传感器, 高延峰等人对圆锥摆式旋转电弧传感器进行了改进并研制出了移动焊接机器人^[3-5]。旋转电弧传感器在 MIG 焊接的运用已得到了较大的发展, 但是旋转电弧 TIG 焊接却少有人研究。旋转电弧 TIG 焊接能发挥旋转电弧传感器和 TIG 焊接的优点, 将其运用于焊缝跟踪有广阔的前景。由于 TIG 焊接和 MIG 焊接工作方式存在差异, 旋转电弧 TIG 焊接信号及其处理方法有别于旋转电弧 MIG 焊接, 旋转电弧 TIG 焊接 V 形坡口时, 旋转过程中钨极到坡口的高度会发生变化, 电弧高度随之变化。即旋转电弧 TIG 焊接利用旋转电弧传感器的工作原理, 对 TIG 焊接过程中的信号进行采集和处理, 进而实现焊缝跟踪。

本文主要基于旋转电弧填丝 TIG 焊接电压波形分析、滤波方法研究以及旋转电弧 TIG 焊接模型的建立, 实现旋转电弧填丝 TIG 焊接高度识别, 为其焊缝偏差识别、焊缝跟踪和旋转电弧 TIG 焊的实

收稿日期: 2018-07-17

基金项目: 国家“863”高科技资助项目(2013AA041003)

作者简介: 贾剑平(1966-), 男, 湖南宁远人, 教授, 博士, 主要研究方向: 焊接自动化及其工艺; 电话: 079183969629;

E-mail: ncujjp@126.com

实际应用打下基础。

1 TIG 焊焊缝跟踪系统

实验用到的 TIG 焊焊缝跟踪系统如图 1 所示,该系统由焊接系统、信号采集系统和运动控制系统三部分组成。焊接系统包括逆变式直流焊机 YC-400TX、等速送丝机构、旋转电弧传感器以及纯氩保护气。信号采集系统由旋转电弧传感器、转速控制板、电压变送器、保护电路、采集卡和工控机组成。运动控制系统由工控机、运动控制卡、驱动器、步进电机、导轨和十字滑块组成。旋转电弧 TIG 焊接采用非接触式引弧,引弧瞬间会产生高频高压冲击,会对采集卡以及电压传感器造成严重影响,故需要保护电路。工控机发出信号给转速控制板,使得旋转电弧传感器恒速转动。旋转电弧传感器转动时,采集卡采集电压变送器测量的电弧电压信号,经过工控机处理,从焊接信号中提取出焊接过程中的焊缝信息。工控机将采集到的信号处理完后将焊炬移动指令发送给运动控制卡,通过控制安装在水平导轨和十字滑块上的步进电机运动实现水平和竖直方向的焊缝跟踪。

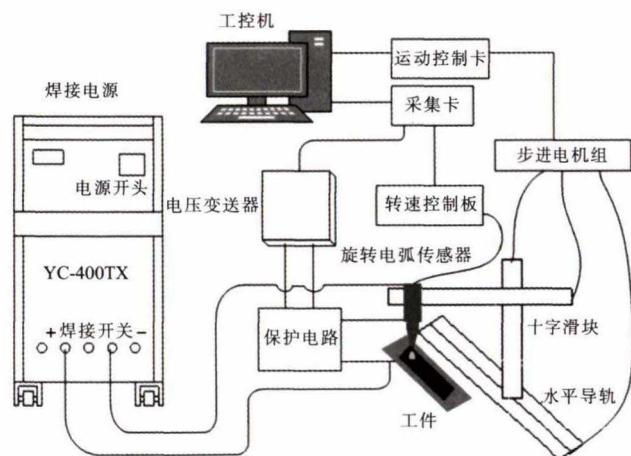


图 1 TIG 焊焊缝跟踪系统示意图

Fig.1 Schematic of TIG welding seam tracking system

2 信号处理

2.1 焊接电压滤波

焊接过程中存在各种噪声,如焊丝熔化、熔滴过渡和电磁场干扰等,采集到的信号需要经过合适的滤波方式才能达到一定的焊缝跟踪精度。旋转电弧传感器通过光耦信号控制硬件触发的采集卡进行采集,采集卡每隔 300 ms 执行一次采集程序,每次采集 4 圈电压信号,每圈采集 1000 个数据。连续采集

多圈既能保证采集信号的实时性,又能减小测量过程中的误差。填丝 TIG 焊接能焊接厚板,对塌陷、咬边和机械性能有改善作用,合适的填丝参数能提高 TIG 焊接质量^[6]。新型的焊丝能够提高 TIG 焊接质量,改善焊缝的金相组织,在一些重要的场合,填丝 TIG 焊接焊缝能够表现出良好的综合性能^[7]。以填丝旋转电弧 TIG 焊的电压信号为研究对象,钨针尖端距离 V 形坡口中心高度 h 为 5 mm,焊枪对中,填丝角度为 45° ,焊丝材料 ER50-6,焊丝与钨极端部距离为 2 mm。送丝方向与焊接方向平行,送丝方式为后置恒速送丝。试验结果的电压波形和频谱如图 2 所示。

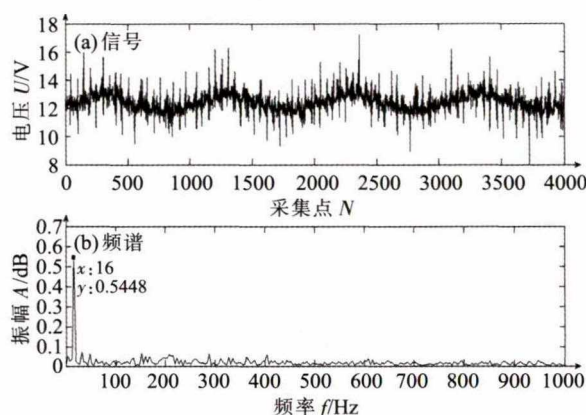


图 2 原始信号及其频谱

Fig.2 The original signal and its spectrum

由图 2 可知,经过旋转电弧扫描电压波形能量主要集中在 16Hz,高频部分能量较少,主要是噪声。利用巴特沃斯低通滤波器设计出 IIR 数字滤波器,可以有效滤除高频噪声。滤波器用式(1)差分方程表示,式(2)是 N 阶巴特沃斯低通滤波器的平方幅度响应。

$$y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) \quad (1)$$

$$J(\Omega) = |H_a(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\Omega)^{2N}} \quad (2)$$

时域中,滤波器的功能可以用式(1)来描述, $x(n)$ 是当前输入, $y(n)$ 是当前输出, a 为滤波器分母系数, b 为滤波器分子系数, N 为滤波器的阶数, M 为 x 初始值的个数, $M \leq N$ 。巴特沃斯滤波器的通带和阻带具有平坦的幅度响应,式(2)中, Ω 是边缘频率,单位为 rad/s。滤波器的截止频率太低,波形失真严重,阶数太低对高频干扰滤波效果太差,阶数越高越浪费资源且滤波效果增加越不明显。利用 MATLAB 的 sptool 工具箱设计 8 阶 IIR 低通滤波

器,调整滤波器的截止频率获得较好的滤波效果,滤波结果和频谱如图3所示。

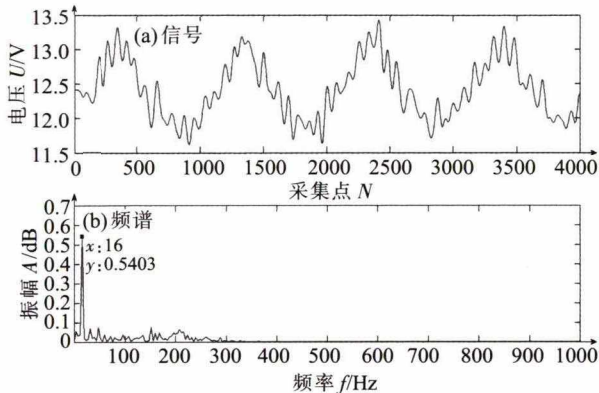


图3 IIR低通滤波后信号及其频谱

Fig.3 Signal and its spectrum after IIR low pass filtering

由图3可知,大部分高频噪声得到了抑制,滤波后信号在低频段能量分布集中,但是还存在一些频率相对较高的噪声。在低通滤波后剩下的频率包含了坡口和焊丝位置信息,不能用简单的低通或者高通滤波器进行滤波,而且旋转电弧扫描到焊缝和焊丝时波形存在尖峰特性。为了保证焊缝跟踪精度需要进一步滤波,对非平稳焊接信号用小波滤波器进行处理^[9]。软阈值小波去噪步骤为:①对信号进行小波分解,选择小波基,确定分解层数 N ;②对小波变换进行阈值处理,软阈值小波滤波阈值函数如式(3)所示;③进行小波重构,得到去噪后的信号。

$$w_t = \begin{cases} \text{sign}(w)(|w|-t) & |w| \geq t \\ 0 & |w| < t \end{cases} \quad (3)$$

式中: w 为对信号进行小波变换后的各细节分量系数; t 为阈值。

小波基消失矩取得越大,越有利于数据压缩和消除噪声,但是计算的时间越长,实时性越差。小波分解的分解层数取得越大,则噪声和信号表现的不同特性越明显,越有利于二者的分离。但另一方面,分解层数越大,重构到的信号失真也会越大,在一定程度上会影响最终去噪的效果。经过不同消失矩和分解层数的尝试,发现DB5小波基6层分解效果好,实时性强。使用DB5小波基函数对经过IIR滤波后的信号进行6层分解、阈值处理和重构,最后的波形和频谱如图4所示。由图4可知,电压波形更加平滑,高频噪声几乎得到了完全抑制,同时焊缝处的尖峰特性、焊缝最左最右侧对应的极小值和焊丝熔池等信息都得到了体现,总体滤波效果比较好。实际焊接过程中前半周期受熔滴影响小,电压波形主要

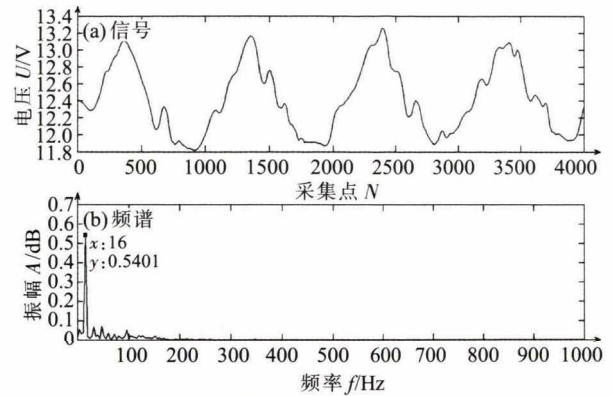


图4 低通、小波滤波后信号及其频谱

Fig.4 Signal and its spectrum after low pass and wavelet filtering

反映焊缝坡口信息。图4(a)中电压波形前半周期比较平滑,与实际情况相符。焊接过程采用后置送丝,电压波形图后半周期受填丝、熔池和熔滴等因素影响较大,无法反映V形坡口的尖峰值,主要反映了填丝、熔池和熔滴等信息,与实际焊接过程符合。

2.2 TIG 焊接模型

TIG焊中,焊接电流一定时,电弧电压与电弧长度之间存在线性关系^[9]。TIG焊接焊缝跟踪采用电弧电压值自动控制系统,为了实现焊缝跟踪,首先要确立弧长与电压变化之间的关系^[10]。焊接电流为165 A,旋转电弧TIG焊接平板时,采集到的电压经过上述滤波,获得电压的平均值。经过试验,焊接电压和电弧长度的关系如图5所示。

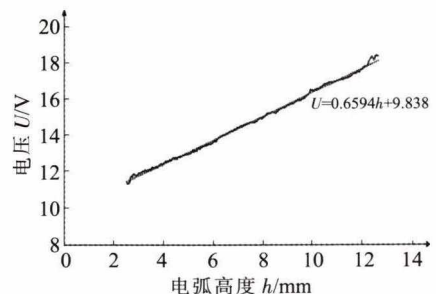


图5 旋转电弧TIG焊接电弧电压与高度模型(165 A)

Fig.5 The model of arc voltage and height in rotating arc TIG welding(165 A)

由图5可知,旋转电弧TIG焊接过程中焊接电压和电弧高度大致呈线性关系,经过拟合得到165 A时旋转电弧TIG焊接电压和电弧的关系式:

$$U=0.6594h+9.836 \quad (4)$$

式中: U 为焊接电弧电压,V; h 为焊接电弧高度,mm。经过分析拟合直线与实际焊接电压最大误差绝对值为0.3882 V,标准差为1.6164,决定系数 R^2

为 0.9974, 线性拟合方程可靠性很高。

3 试验分析

试验使用松下 YC-400TX 直流逆变焊机, 具有恒流输出特性。试验条件: 保护气体为纯氩; 气体流量 15 L/min; 焊接电流为 165 A; 焊接材料为 4 mm 厚低碳钢; V 形焊缝夹角为 140°; TIG 焊接速度为 1.848 mm/s; 钨极垂直方向抬升速度为 0.125 mm/s; 旋转电弧传感器旋转频率为 16 Hz; 旋转半径 2.5 mm; 送丝速度为 27 mm/s; 焊枪对中, 水平偏差为零。水平方向为主要焊接方向, 同时垂直方向高度匀速上升, 即焊接电弧高度匀速增加。焊接试件如图 6 所示。采集到的电压信号经过滤波处理, 以每次采样的 4 个最大值的均值表示当时焊接电弧高度 h 对应的电压值, 将电压值通过实际模型转化为电弧高度, 经过线性拟合得到的焊接电弧高度变化曲线如图 7 所示。

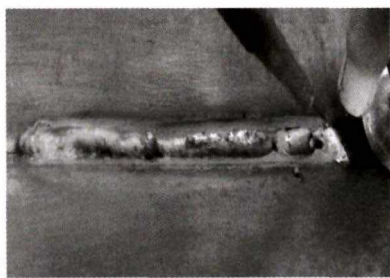


图 6 焊接试件
Fig.6 Welding specimen

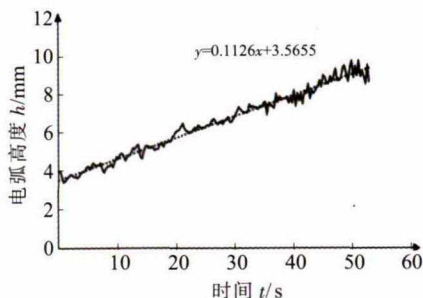


图 7 焊接电弧高度变化曲线
Fig.7 The change curve of welding arc height

由图 7 知钨极抬升速度一定时, V 形坡口的旋转电弧 TIG 焊接电弧高度的变化率近似为常数, 焊接电弧高度越高时电弧高度波动越大, 与实际情况吻合。线性拟合方程为:

$$h = 0.1126t + 3.5655 \quad (5)$$

式中: h 为焊接电弧高度; mm; t 为焊接时间, s。经过分析拟合直线与焊接电弧高度最大误差绝对值为 0.5231 mm, 标准差为 2.2128, 决定系数 R^2 为

0.9791, 线性拟合方程可靠性很高。实际焊接电弧增长速度为 0.125 mm/s, 测量的焊接电弧高度经过回归分析得到的焊接电弧高度变化率与理论值相对误差为 9.92%。故上述方法对旋转电弧 TIG 焊接高度识别效果很好, 完全能够反映了焊枪高度的变化特征。

4 结论

(1) 设计了填丝旋转电弧 TIG 焊接信号滤波算法, 对焊接电压滤波效果较好, 能够准确识别坡口信息, 同时保留了填丝焊接的重要信息。

(2) 建立了 165 A 时旋转电弧 TIG 焊接电压与电弧高度之间的数学模型。

(3) 通过试验验证了旋转电弧 TIG 焊接电压信号滤波方法以及数学模型的准确性, 用测量值进行回归分析, 得到的电弧高度变化率相对误差为 9.92%, 电弧高度测量值与回归分析值的最大误差为 0.5231 mm。

参考文献:

- [1] 李晓延, 武传松, 李午申. 中国焊接制造领域学科发展研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 19-31.
- [2] 常云龙. TIG 焊接技术研究现状及发展趋势[C]//中国造船工程学会. 中国船舶与海洋工程焊接与涂装技术发展论坛论文集. 中国造船工程学会, 2012: 6.
- [3] 洪波, 魏复理, 来鑫, 等. 一种用于焊缝跟踪的磁控电弧传感器[J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 1-4.
- [4] 叶艳辉, 张华, 覃庆文, 等. 旋转电弧传感器结构优化设计[J]. 现代制造工程, 2014(11): 14-17.
- [5] 高延峰, 肖建华, 张华. 移动机器人波纹板折线角焊缝跟踪控制[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 49-52.
- [6] Liu Liming, Hao Xinfeng. Low-power laser/TIG hybrid welding process of magnesium alloy with filler wire [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25(11): 1213-1218.
- [7] Huang Bo, Zhang Junyu, Wu Qingsheng. Microstructure and mechanical properties of China low activation martensitic steel joint by TIG multi-pass welding with a new filler wire [J]. Journal of Nuclear Materials, 2017, 490: 115-124.
- [8] 李恒, 陈育浩, 薛海涛, 等. 焊接电弧电信号滤波方法的选用[J]. 焊接, 2003(11): 29-32.
- [9] Cook G E. Robotic arc welding: research in sensory feedback control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1983, IE-30(3): 252-268.
- [10] Karafi M R, Narimani R, Hojjat Y, et al. Study on automatic control of arc gap in robotic TIG welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(9-12): 953-960.