

# 一种不规则焊缝自适应焊接机器人系统研究

陈海初, 羡浩博

(南昌大学 机电工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:**提出了一种基于摆动电弧传感器焊接系统的焊缝宽度自适应焊缝跟踪算法。焊接摆动控制器由步进电机驱动滚珠丝杠机构,实现焊枪的摆动。机器人主控制器基于 ARM 处理器开发,实现机器人的运动轨迹控制、运算求解、示教、再现。通过分析摆动电弧的信号和焊枪前一周期摆动数据,建立复函数自适应算法控制模型,计算出焊缝变化后的摆动参数反馈控制系统,完成焊缝宽度自适应跟踪焊接,并以  $x, y, z$  三轴直角坐标焊接机器人为运动平台进行模拟试验来验证算法的合理性。试验结果证明,焊接速度 4 mm/s、焊接频率 0.5 Hz 条件下,该算法能良好的适应焊接过程中焊缝宽度的变化,性能稳定,焊枪运动轨迹良好。

**关键词:**焊接机器人;焊缝跟踪;焊接摆动器;自适应

**中图分类号:** TG444 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.02.019

## Study on an Adaptive Welding Robot System for Irregular Welding Seam

CHEN Haichu, XIAN Haobo

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** A seam width adaptive seam tracking algorithm based on swing arc sensor welding system is proposed in this paper. The welding swing controller drives the ball screw mechanism by stepping motor to realize the swing of the welding gun. The main controller of robot is developed based on ARM processor to realize the control of motion trajectory, calculation, teaching and reproduction. By analyzing the signal of the swing arc and the previous cycle swing data of the welding torch, the complex function adaptive algorithm control model is established, the swing parameters after the change of the welding seam are calculated and fed back to the control system, then the weld width adaptive tracking welding is completed. The  $x, y, z$  three-axis orthogonal coordinate welding robot is used as the moving platform to verify the rationality of the algorithm. The experimental results with 4 mm/s of the welding speed and 0.5 Hz of the welding frequency show that the algorithm can well adapt to the change of weld width in welding process. The performance is stable and motion trajectory is good.

**Key words:** welding robot; tracking of welding seam; welding oscillator; adaptive

## 0 引言

在实际生产过程中,中厚板焊接工件由于下料、组对装配等存在不确定性,焊缝宽度往往呈现无规律偏差状态<sup>[1-3]</sup>。焊接机器人在焊接时,实际焊接路径常会偏离示教路径,导致不规则焊缝条件下无法得到良好的焊接质量。此外,焊接机器人焊接完成后还需要对焊件进行打磨或补焊。如果机器人能够自动适应焊缝宽度变化,焊缝变窄时,自动减小摆动幅度,并加快焊接速度;焊缝变宽时,自动增大摆动幅度,同时降低焊接速度,则可以实现焊缝填充量的一致性,确保焊缝的焊接质量和焊接的美观性,也将减少额外的工序提高焊接效率。目前市场没有

能自适应不规则焊缝的机器人,因此,具备适应不规则焊缝能力的焊接机器人将有广阔的应用前景。要实现焊接机器人自适应不规则焊缝,焊缝跟踪是难以突破的难题。焊缝跟踪有多种实现方式,如基于视觉的焊缝跟踪系统、基于电磁传感器的焊缝跟踪系统以及基于电弧传感器的焊缝跟踪系统<sup>[4]</sup>。电弧传感器凭借无需焊枪添加元件,实时性好等优势在焊接领域运用广阔。本文通过分析摆动电弧传感器信号,设计基于步进电机和滚珠丝杆系统的摆动器。对不规则焊缝,提出了一种基于复函数的控制算法,实现机器人对不规则焊缝的自适应焊接。

收稿日期:2017-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51265034)

作者简介:陈海初(1975-),男,湖南常德人,副教授,博士,主要从事嵌入式系统、智能机器人控制技术、焊接机器人及系统集成技术、传感器技术的研究。

### 1 机器人控制系统组成

图1为焊接机器人采用的直角坐标结构,由  $x, y, z, r$  4个导轨轴按笛卡尔坐标系组装。 $x$ 轴由齿轮和钢轨组成,伺服电机通过齿轮传动驱动机器人沿导轨移动,提供焊接时前进方向的运动; $y$ 轴导轨固定在  $x$ 轴小车平台上,伺服电机滚珠丝杆驱动焊枪在  $y$ 方向移动,提供焊接时左、右方向的运动; $z$ 轴导轨固定在  $y$ 轴导轨滑台上,步进电机通过滚珠丝杆驱动焊枪在  $z$ 方向移动,实现机器人抬枪及小坡度焊缝的路径再现时的高度方向的运动; $r$ 轴导轨固定于  $z$ 轴导轨滑台上, $r$ 轴为安装焊枪的摆动轴,焊枪与导轨滑块固结。 $r$ 轴滑块的往返带动焊枪的摆动,通过改变  $r$ 轴步进电机的运动实现焊枪的摆动幅值、速度和摆动频率的调节。 $x, y, z$ 轴的插补可实现不同示教轨迹的再现<sup>[4-5]</sup>。

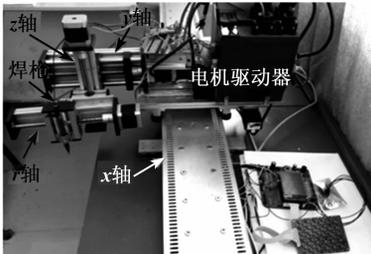


图1 直角坐标焊接机器人结构图

机器人控制系统核心采用 STM32 微处理器,主要包括电源模块、液晶显示模块、键盘模块、电机驱动等模块,系统控制主板如图2所示。微控制单元(MCU)产生控制信号,通过 485 总线连接各电机驱动器,控制各电机执行相关运动控制指令,从而实现焊缝轨迹的示教、再现和焊枪摆动的控制。液晶屏主要显示系统当前状态、提示下一步操作以及

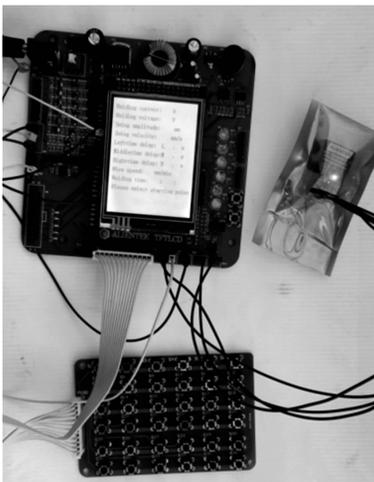


图2 机器人系统控制板图

焊接状态的各项参数;矩阵键盘功能为信息输入,示教点采集、运行模式选择、存储及再现焊接等均由键盘设置。

### 2 复函数控制原理

电弧传感的基本原理是利用焊枪和工件的间距变化而引起焊接参数变化来探测焊枪和焊缝的相对位置关系。在等速送丝调节系统中,MIG 焊接电源一般具有恒电压外特性,这种情况下,焊接电流将随着电弧长度的变化而变化<sup>[6-7]</sup>,摆动过程电弧长度的变化直接表现为焊接电流的变化,焊接电流的变化可用霍尔传感器检测;对摆动电弧传感器信号处理<sup>[7-8]</sup>,如何排除干扰获得良好的信号也是焊接自动化过程的难点,有待进一步研究,本文理想化为正弦波变化模型讨论。目前的焊接机器人焊接宽度为均匀的焊缝时,几乎都采用正弦函数模型<sup>[9-11]</sup>,焊枪摆幅与时间的关系如图3所示。

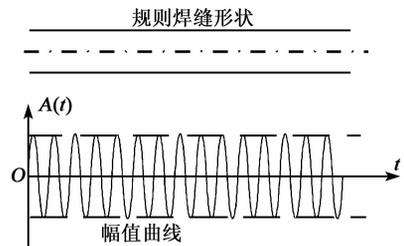


图3 均匀焊缝摆幅函数图

焊枪从焊缝中心开始摆动,焊枪摆幅随时间的变化关系为

$$A(t) = A\sin(\omega t) \tag{1}$$

式中: $A$ 为摆动幅值常数; $\omega$ 为时间系数,若无要求,赋值为1; $t$ 为时间,此模型广泛应用于实际焊接。但遇到不规则焊缝,焊接质量会严重下降,甚至要通过补焊、打磨才能使焊件合格。为了能够自动适应不规则焊缝,在式(1)的基础上增加补偿因子,提出复函数模型为

$$A(t) = A\cos(\omega t) + iB\sin(\omega t + \varphi) \tag{2}$$

式中: $A\cos(\omega t) + iB\sin(\omega t + \varphi)$ 为变化焊缝宽度补偿, $B$ 为补偿幅值常数; $\varphi$ 为相位参数;虚数单位  $i$  作为智能控制标识符(控制因子,存在-1、0、1三种状态),能根据摆动方向及传感信号进行自动选择,当焊缝变宽时取1,变窄时取-1,未发生变化时取0。经过焊接经验设置参数时, $A$ 设置约为焊缝宽的70%, $B$ 的取值约为  $A$  的一半。采用复函数模型时,改变  $\varphi$  的取值,将幅值曲线在焊缝变化时局部改变,焊枪摆幅与时间的关系如图4所示。

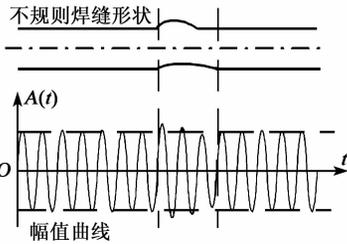


图 4 不规则焊缝摆幅函数图

### 3 不规则焊缝自适应设计

焊枪循环摆动过程中,通过比对焊接电流和焊枪实际位置信息,确定实际焊缝宽度的数值。对比前一周期的焊缝的宽度来调节脉冲宽度调制器(PWM)分频参数,使焊枪摆动频率一致,确保铁水均匀地分布在焊缝熔池内,保障焊接效果。焊枪摆动模型如图 5 所示。

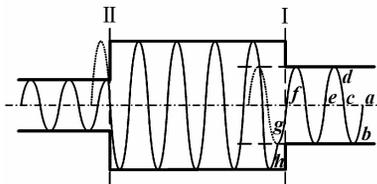


图 5 焊枪摆动模型图

焊接由右向左行进,在 I 区域右侧焊缝宽度均匀,焊枪从焊缝中心 a 点开始向边界 b 点摆动,弧长逐渐减小,焊接电流逐渐增大,系统实时检测焊接电流 I 和焊枪驱动脉冲数 N,当 I 等于边界值 I<sub>0</sub> 且实际脉冲数 N 小于设置摆幅对应脉冲数 N<sub>0</sub> 时,判断实际焊缝宽度比设置值小(见图 5 中 II 位置);智能控制因子设置为 -1,更新摆幅脉冲数 N=N<sub>1</sub>,调节 φ,计算更新摆动频率的修正值;当 I=I<sub>0</sub> 且 N<sub>1</sub>=N<sub>0</sub> 时,判断实际焊缝宽度等于设置宽度;智能控制因子设置为 0,参数无需改变;当 I<I<sub>0</sub> 且 N<sub>1</sub>=N<sub>0</sub> 时,判断实际焊缝宽度比设置值大,智能控制因子设置为 1,焊枪继续当前方向摆动,I=I<sub>0</sub> 时停止摆动,焊枪处于实际焊缝边界(见图 5 中 I 位置)。此时的脉冲计数为 N<sub>1</sub>,更新摆幅脉冲数 N=N<sub>1</sub>,调节 φ,计算更新摆动频率的修正值;焊枪以更新后的摆动速度回摆 N 个脉冲数,从焊缝边界 b 回到焊缝中心 c 点。焊枪从焊缝中心 c 点向边界 d 点再摆回至焊缝中心 e 点过程与焊缝从 a 点摆至 c 点过程一致,只是焊枪摆动方向相反。

焊缝宽度发生变化时,可由复函数模型得到变化量为

$$\Delta A = A(t) - A(t - T) \quad (3)$$

式中 T 为摆动周期。焊枪摆动频率保持不变,那么焊缝宽度变化前后,焊枪由焊缝中心摆动至焊缝边界时间相同,由此可推导出基于摆动速度的复函数控制模型:

$$v = v_0 - i \times \left[ \frac{A(t - T)}{A(t)} - 1 \right] \times v_0 \quad (4)$$

式中: v 为摆动速度; v<sub>0</sub> 为系统初始焊接速度。

控制系统中,焊枪摆动幅度由主控芯片发出的脉冲数决定,摆动速度由脉冲频率决定。根据软件设置推导产生 PWM 脉冲频率的计算公式:

$$f_0 = \frac{CLK \times 10^6}{(1 + arr)(1 + psc)} \quad (5)$$

式中: CLK 为系统时钟频率; arr 为重装载寄存器值; psc 为预分频值。摆动机构滚珠丝杆的导程为 P<sub>h</sub>,步进电机步距角为 α,驱动器细分精度为 m。A 与 N 的关系式为

$$A = P_h \times n = \frac{P_h \times \alpha \times N}{360 \times m} \quad (6)$$

由此可得

$$v = \frac{P_h \times \alpha \times CLK \times 10^6}{360 \times m \times (1 + arr)(1 + psc)} \quad (7)$$

已知 A 和 v,则可以确定焊枪摆动频率 f,其推导公式为

$$f = \frac{v}{4A} \quad (8)$$

焊接时, f 是根据焊接条件设置的定值,焊缝发生变化时要保证 f 不变,就必须调整预分频值。结合式(7)、(8)可推导出不规则焊缝自适应算法的最终实现形式为

$$psc = \frac{1 + psc_0}{1 - i \times \left[ \frac{A(t - T)}{A(t)} - 1 \right]} - 1 \quad (9)$$

式(9)可计算任何摆幅条件下 psc 的参数值。当实际摆幅和设置摆幅存在偏差时,将新计算的预分频值更新至控制系统中,就可以保证焊枪在摆动频率不变的情况下改变摆动幅值,还能保证焊枪摆动中心始终与焊缝中心重合。这样得到的焊接产品不仅接口性能良好、外观漂亮,而且不需要额外的打磨工序,大大提高了焊接效率。

### 4 试验及结果

为了验证上述算法的正确性,以上述直角坐标焊接机器人为运动平台,用铅笔代替焊枪,通过铅笔在白纸上画线来模拟焊枪在焊接过程的运动轨迹。模拟原理如图 6 所示。使用一块 ARM 控制板产生模拟输出电压,模拟焊接电流的输入信号。模拟电压经过限流电阻后分成两路,一路连接主控系统焊接电流检测接口,另一路连接导电画笔。模拟焊缝边界与主控系统共地。画笔位于焊缝之内时主控系统检测到焊接电流信号为输入的模拟电压值,当画笔与焊缝边界接触时主控系统检测到焊接电流信号模拟电压值为 0。通过分析焊接电流信号,可以得

到在任何摆动频率下的焊枪的摆动幅值。实验在直线焊缝条件下进行,机器人平台再现示教直线轨迹,摆动器摆动带动画笔画出实际轨迹。

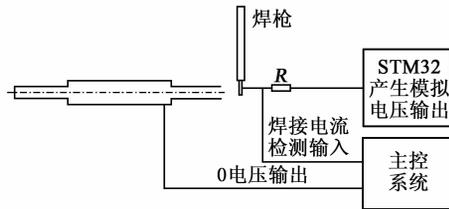


图6 模拟原理图

模拟焊枪轨迹实物平台如图7所示,实验参数设置如下:CLK设置为72 MHz;arr设置为719;摆动机械结构滚珠丝杆的 $P_h=8$  mm; $\alpha=1.8^\circ$ ;m为8细分。模拟焊缝宽为10 mm和30 mm两个等级变化值,摆动频率为0.5 Hz,焊接速度为4 mm/s。在此条件下对各种情况焊缝模拟试验得到焊枪轨迹图。实际焊接时焊缝的宽度一般不会超过20 mm,焊枪摆动幅值一般设置为焊缝宽的70%左右,为了使实验效果更明显,试验采用的焊缝形式有10 mm和30 mm均匀焊缝以及在10 mm均匀焊缝中插入一段30 mm均匀焊缝的不规则焊缝并分别进行试验。图8、9为均匀焊缝的实验结果,图10为不规则焊缝条件下无自适应算法的实验结果,图11为不规则焊缝条件下使用自适应算法的实验结果。

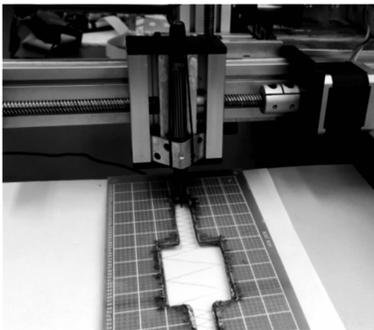


图7 模拟实物平台



图8 10 mm 均匀焊缝实验结果

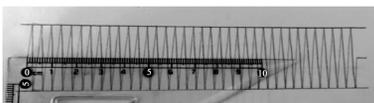


图9 30 mm 均匀焊缝实验结果

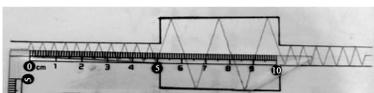


图10 变化焊缝无自适应算法实验结果

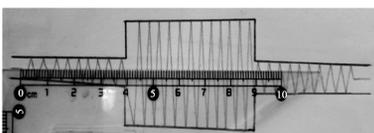


图11 变化焊缝自适应算法实验结果

通过实验可看出,焊缝宽度均匀时,无论是10 mm焊缝还是30 mm焊缝,焊枪每次经过焊缝中心 $x$ 方向均移动4 mm的距离,轨迹均匀焊接效果较好;在焊缝宽度变化时,如果不采用自适应算法,焊缝变宽部分焊枪的轨迹周期明显变长,焊枪每次经过焊缝中心 $x$ 方向移动12 mm的距离,途中有部分距离为11 mm,分析轨迹最大值产生的原因是焊缝宽度实际上不是严格的30 mm。显然,当焊缝宽度增至3倍时摆动周期也变成原来的3倍,如此焊接显然无法得到良好的焊接质量。由图11可知,当采用自适应算法时,焊枪的摆动周期几乎不受焊缝宽度的影响,只是在焊缝变化的第一个摆动周期内发生较小的变化,从焊接效果来看该变化几乎可忽略,得到焊缝质量与均匀焊缝一样。

## 5 结束语

针对焊接过程中焊缝宽度不规则变化引起的焊接质量问题,研究了不规则焊缝复函数自适应算法。该算法利用摆动电弧传感器检测当前焊枪偏差信息和前一周期检测的焊缝宽度信息,简单、快速的计算出适应新宽度焊缝的参数。通过模拟试验证明,焊接轨迹在焊缝变化较大的情况下依旧能够保持良好的焊接轨迹,误差在可允许误差范围内,有效提高了不规则焊缝的焊接质量。在进一步的研究中,将开展实际焊接测试,来验证复函数自适应焊接控制算法,并根据试验结果来进行修正与完善。

## 参考文献:

- [1] 宋金虎. 我国焊接机器人的应用与研究现状[J]. 电焊机, 2009, 39(4): 18-20.
- [2] 曾松盛, 石永华, 王国荣. 基于电弧传感器的焊缝跟踪技术现状与展望[J]. 焊接技术, 2008, 37(2): 1-5.
- [3] 吴冬春, 李金友. 基于模糊控制的焊缝自动跟踪系统的设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(6): 73-76.
- [4] 张姝, 王滨, 鞠洪涛, 等. 基于 ARM9 和 CAN 总线的 TIG 焊机器人示教盒设计[J]. 电焊机, 2012, 42(6): 102-104.
- [5] 姜振平, 张文明, 李伟, 等. 七自由度焊接操作机示教系统设计[J]. 热加工工艺, 2013, 42(11): 215-217.
- [6] 叶艳辉, 张华, 高延峰, 等. 电弧传感器静态数学模型的试验研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(9): 185-190.
- [7] 郭祖魁. 摆动电弧焊缝跟踪技术的研究现状[J]. 电焊机, 2009, 39(4): 36-38.
- [8] 刘越, 刘念, 赖长川, 等. 基于正弦摆焊的弧焊机器人焊缝跟踪系统的研究[J]. 机械与电子, 2016, 34(10): 76-80.
- [9] 李湘文. 中厚板复杂轨迹焊缝跟踪的关键技术研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012.
- [10] 王天祥. 基于 WiFi 焊接远控与焊缝电磁跟踪系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [11] 高延峰, 张华, 毛志伟, 等. 轮式机器人折线焊缝跟踪协调控制方法[J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 33-37.