

基于旋转电弧传感的示教再现 弧焊机器人智能化研究*

张 华

(南昌大学机电工程学院 南昌 330029)

熊震宇

(南昌航空工业学院)

贾剑平 潘际奎

(南昌大学)

摘要: 针对目前示教再现弧焊机器人存在的不足, 研制了适合机器人要求的旋转电弧传感器, 研究了焊缝信息处理方法, 提出了采用模糊控制方法, 实现了示教再现弧焊机器人在线焊缝纠偏, 取得了较好的试验结果, 提高了机器人的智能化和适应性。

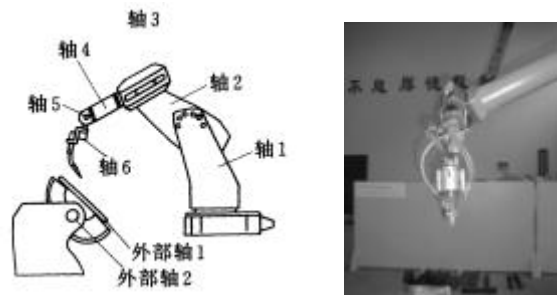
关键词: 电弧传感器 弧焊机器人 模糊控制 焊缝纠偏

中图分类号: TG442

0 前言

示教再现弧焊机器人已经广泛应用在工业生产中, 极大地提高了生产率, 但是由于其工作方式是示教再现, 对于复杂焊缝存在编程复杂、效率低, 同时对工件一致性、夹具精度要求高, 而且要求工件在焊接过程保持不变形。为了简化编程, 提高对工件的适应性, 一般示教再现弧焊机器人都带有摆动电弧传感器, 由于摆动频率比较低, 焊缝纠偏灵敏度比较低。旋转电弧传感器应用于弧焊机器人焊缝纠偏显示了很大的优越性, 日本研制了齿轮传动的旋转电弧传感器, 但机构比较复杂^[1]。清华大学自20世纪80年代以来一直从事旋转电弧传感器研究, 在旋转机构设计上获得了国家专利^[2], 同时在信号处理、控制技术等方面进行了大量的工作, 并且应用于自动焊机上实现了焊缝自动跟踪^[3, 4]。为了将该传感器应用于弧焊机器人, 南昌大学在传感器的机构改造、焊缝信息处理、模糊控制方法等方面进行了大量的研究工作, 实现了示教再现弧焊机器人的在线焊缝纠偏, 进一步提高了机器人的智能化和适应能力^[6]。

76AW型弧焊机器人如图1a所示, 它具有6自由度本体结构和2自由度的外部变位器。旋转扫描电弧传感器外形如图1b所示, 其主要技术指标为: 频率0~30 Hz之间可调; 扫描半径0~3.5 mm可调, 电弧在圆周上的角位置可准确识别并与采集信息同步输出, 采用空心轴电动机直接驱动电弧旋转。弧焊机器人焊缝纠偏系统的工作原理如图2所示: 电弧传感器将焊炬高度的变化转换为焊接电流的变化, 经过A/D采集变成数字信号送入计算机进行处理, 计算机将该信号进行数字滤波后求得左右、高低偏差, 经过控制器得到左右、高低控制信号, 经A/D采集卡上的I/O口输出到机器人接口, 控制机器人手臂的运动, 最后实现机器人焊缝自动纠偏。



(a) 76AW型弧焊机器人 (b) 替代焊枪旋转电弧传感器
图1 旋转电弧传感的示教再现弧焊机器人

1 旋转电弧传感的机器人系统

旋转电弧传感的弧焊机器人系统由示教再现弧焊机器人和旋转电弧传感系统组成。示教再现

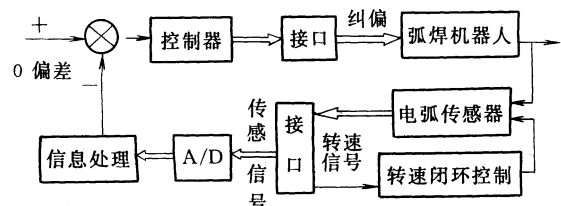


图2 弧焊机器人焊缝纠偏系统原理框图

* 国家自然科学基金(59875034)和江西省主要学科跨世纪学术与技术带头人培养资助项目, 20020830收到初稿, 20021020收到修改稿

2 旋转电弧传感原理及焊缝信息处理

电弧传感是包括旋转机构、焊接电源、送丝机构、霍尔传感器等在内的整个传感系统。其原理是通过坡口扫描，利用焊炬高度变化引起的焊接电流变化来获得反映焊缝坡口的截面几何信息，同时获得了反映焊炬偏离焊缝坡口中心线横向距离 d 。从信号处理的角度来说，焊炬的位置 (h, d) 和坡口形式在焊炬的扫描激励下被调制成焊炬的高度变化 $h(t)$ ，经过电源—电弧的传感作用，变成焊接电流信号 $i(t)$ ，如图3所示。焊炬位置的高度变化信号与焊接电流信号之间的变换关系由传感系统的传递函数决定，由于传感过程中不可避免受到各种噪声的干扰，如熔滴过渡、铁水流动造成的坡口形式被破坏，传感特性 $G(s)$ 对传输信号造成的变化，送丝速度的波动等因素造成的电弧信号自身的不稳定等。

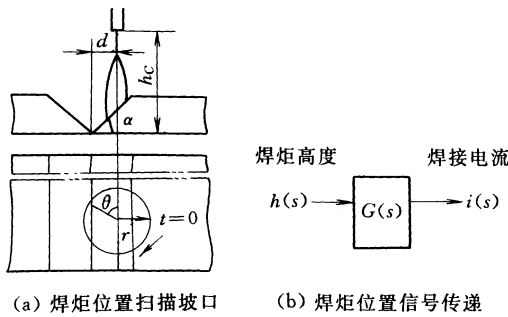


图3 电弧传感原理图

电弧扫描的频率对电流响应信号的相位存在影响。在焊接参数为电压 30 V、电流 240 A、焊接速度 50 cm/min 时，扫描频率分别为 8 Hz、15 Hz、24 Hz 时的电流响应相位变化实际结果分别在 $+30^\circ$ 、 -10° 、 -40° 左右。因此在低频和高频时，相位均有很大的超前或滞后。在 15 Hz 时，电流变化较为真实地反映了高度信号的变化。

系统的关键问题是从电流变化信号中提取焊枪偏离焊缝大小。传统焊缝识别方法有极位差值法和左右积分差值法。前者是利用焊炬位于最左端和最右端的高度时的电流采样值差，后者是将焊接电流进行短时间的积分，以焊炬旋转至左侧部分的所有采样值之和，与右侧部分所有采样值之和的差值来表现横向偏差。极位差值法简单直观，易于理解，但信号随机干扰的存在使得求到的极值点很不可靠，例如，工件表面不平整，电弧的短路过渡。而积分差值法对左右两侧一段区间先积分，然后再进行比较，这样可以在一定程度上抑制随机干扰。

采用特征谐波法，对于 V 形坡口焊炬高度变化

可用傅里叶级数的形式表示为

$$h(t, q) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} a_k \cos k\omega t \quad (1)$$

式中

$$a_k = \left[\begin{array}{c} \frac{2\sin\left(\frac{(k-1)\delta}{2} + (k-1)q\right)}{(k-1)\delta} - \frac{4\sin q \sin\left(\frac{k\delta}{2} + kq\right)}{k\delta} \\ \frac{2\sin\left(\frac{(k+1)\delta}{2} + (k+1)q\right)}{(k+1)\delta} \end{array} \right] r \tan \alpha \quad (2)$$

式(2)可以看出焊炬高度变化的各次谐波幅值 a_k 是 θ 的函数，也就是偏差 d 的函数。图4分别给出了两种坡口谐波幅值与偏差的关系。

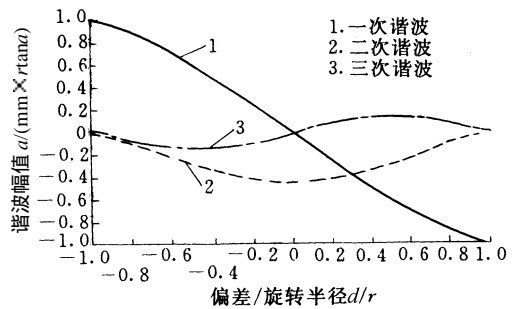


图4 V形坡口谐波幅值与偏差的关系

从图中可以看出，随着偏差 d 从负到正变化，V形坡口的一次谐波从正到负变化，基本是线性关系，谐波幅值反映了偏差的变化。这样就可以通过电流信号的谐波幅值来检测偏差 d 的大小。特征谐波的幅值由偏差的大小决定，偏差的方向则是根据特征谐波的相位 $q_i=0$ 或者 $q_i=\pi$ (幅值为负) 来判断，但是在实际检测到的响应信号中， q_i 与以下几个因素有关：① 系统的传递函数 $G(s)$ ，根据扫描频率的不同，特征谐波的相位产生移动(超前或滞后) q_s 。② 焊缝与焊接方向的夹角 q_d ，高度信号的特征谐波相位不再是 0 而是 q_d ，这将反映到电流信号中。③ 调节的影响，跟踪时焊炬左右调整，焊缝与焊接运动方向存在变化的夹角 q_t 。实际上 q_d 和 q_t 只有一种会发生，这样 q_i 最终可以表示为

$$\text{开环: } q_i = q_s + q_d$$

$$\text{闭环: } q_i = q_s + q_t$$

实践数据表明，在扫描频率小于 50 Hz 时，可以认为 $|q_s| < 45^\circ$ 。一般情况，焊缝偏角 $|q_d| < 45^\circ$ ，那么最终的相角变化不会超出正负 90° 范围，这样就可以抛开相位的定量计算，而通过定性判断确定偏差的方向。

由此可见：坡口偏差由焊接电流的特征谐波反映，特征谐波的幅值反映偏差的大小，相位反映偏

差的方向，当相位 q_i 满足 $|q_i| < 90^\circ$ 时，焊缝偏右，反之当相位 q_i 满足 $|q_i| > 90^\circ$ 时，焊缝偏左。

熔池对焊缝识别存在很大的影响。试验结果表明，即使在焊缝对中时或者平板焊接时，仍然存在相当大的特征谐波分量，而且对于特定的焊接条件，这个分量表现为固定的大小和相位，如果被忽视，必将对偏差的判断带来误差，最终使焊缝纠偏控制产生稳态误差。根据熔池造成的干扰的变化规律，这里引入一个调整因子 \hat{a}_k 对数据进行加权校正，从而达到减小干扰的目的。实际熔池的形状很难用精确的数学表达式来描述，但是简化后可以表述为：堆敷表面在左右方向上是一个平面，在前后方向上线性下降。这样，由于熔池的影响，使得电流信号沿着纵向产生变化如图 5a 所示，而图中虚线即为熔池的干扰。对于每一个特定的空间位置，选取适当的调整因子 $\hat{a}_k(\hat{a}_k < 1)$ 对数据进行加权，即 $I'(k) = I(k)\hat{a}_k$ 。图 5b 显示了经过加权处理以后，电流波形变化的情况，图中可以看出加权处理以后，熔池的影响明显减小。图 6 为 V 形坡口对中时，经过加权处理后特征谐波幅值变化情况，其中调整因子 \hat{a}_k 取 0.8^[6]。

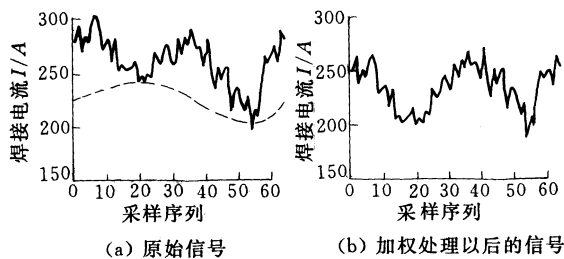


图 5 加权处理的结果

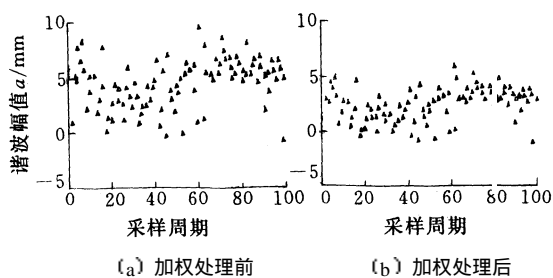


图 6 V形坡口加权处理前后特征谐波

3 旋转电弧传感的焊缝跟踪模糊控制

机器人自带焊缝纠偏系统，采用摆动扫描方式，通过机械手臂的左右摆动扫描焊缝，比较左右两端极位焊接电流，从而获得焊缝的偏差信息，然后控制机械手臂的左右、上下运动达到纠偏的目的。这种纠偏系统由于摆动的频率低(小于 5 Hz)，

系统的实时性不好，只能用于较低焊接速度的情况。

采用旋转电弧传感的控制系统工作流程如图 7 所示，控制系统的执行机构是机械手臂，它的运动通过机器人控制柜编程示教来实现，另外机器人内部还提供了用于纠偏信号输入的接口，共有 4 个输入口，分别对应左、右、高、低 4 个纠偏信号的输入。高度方向偏差处理及跟踪控制较为简单，在给定的焊接电压和送丝速度下，焊接平均电流 I 和高度 h 成比例关系，这里采用比例控制器。纠偏信号为高电平时，机械手臂在对应的方向上移动，高电平持续的时间就是移动的时间。纠偏移动距离 $d = vt$ ，其中， v 为移动速度， t 为移动时间，纠偏移动速度 v 的大小由机器人编程设定，左右方向和高低方向的移动速度可以单独设定，例如，机器人内部命令 SSPD(20, 30)表示左右方向的移动速度为 2 mm/s，高低方向的移动速度为 3 mm/s，两个方向上的最大移动速度为 5 mm/s。整个执行机构的开环工作特性为 $G_1(s) = K_1/s$ ，对于执行机构来说，纠偏速度是预先设定好的，如果焊接速度一定的话， K_1 是固定不变的，传递函数 $G_1(s)$ 可以确定下来。

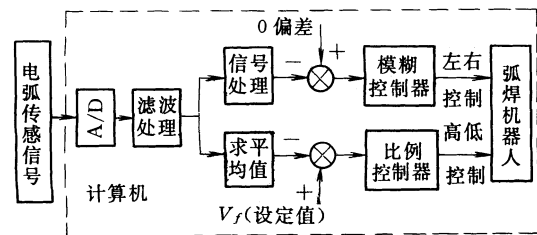


图 7 控制系统工作流程图

控制对象总的传递函数为

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{K_1}{s} \frac{K_2(1+T_1s)}{(1+T_2s)(1+T_3s)}$$

式中的 $G_2(s)$ 为电弧传感系统的传递函数，参数(T_1, T_2, T_3, K_2)主要取决于焊接电源和工艺参数等因素。

由于焊接本身是一个复杂的过程，存在很大的干扰和不确定因素，所以不可能得到准确的数学模型，采用模糊控制技术设计控制器^[5]。这里选择二维的模糊控制器，输入信号为焊炬与焊缝之间的左右偏差 d 以及偏差的变化 d_c ，输出量为左右纠偏的时间 u 。见图 8 所示。模糊控制器的设计步骤如下



图 8 模糊器框图

软件部分是以 Visual C++6.0 为工具在 Windows98 操作系统下开发的 MFC 应用程序。程序采用模块化设计，主要的类有：信号的采集类

CAD、控制器设计类 CControl、信号处理类 CProcess、磁盘输入或者输出类 CAutoDoc、视图类 CAutoView、处理应用程序类 CMainFrame。

4 焊缝纠偏系统试验结果

系统参数包括焊接参数、扫描频率和控制器参数 3 个部分。扫描频率的选择要根据传感的灵敏度和实时跟踪的要求来确定,一般在 10~30 Hz 范围内时,传感的灵敏度趋于饱和,达到最大值。扫描频率越高,用于采样的时间越短,系统的实时性就越好,但是考虑到扫描频率太高时,电弧不稳定,影响焊缝质量和电弧信号的提取,这里扫描频率选为 15 Hz。

控制器参数包括模糊控制器的量化因子 k_d 、 k_{dc} 和比例因子 k_u 和控制周期 T 。控制周期的大小对系统的响应有很大的影响,周期太短,容易引起震荡;太长则减慢纠偏速度。根据信号采样的时间、信号处理的时间、输出控制的时间以及纠偏精度的要求来确定,这里选 k_d 为 2、 k_{dc} 为 1.8、 k_u 为 50,控制周期为 400 ms。

试验采用的焊接规范为:角焊缝(90°)、V 形坡口;氩气、混合气体(85%Ar+15%CO₂)保护;焊接电流 240 A;焊接电压 30 V;焊接速度 50 cm/min。用混合气体作为保护气体进行试验,电弧旋转半径为 2 mm, A 点为示教起弧点, B 点为示教收弧点,偏差角度 α 为 15°,如图 9 所示。



图 9 V形坡口焊缝跟踪试验

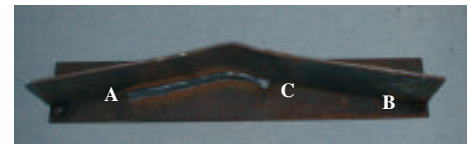
用混合气体作为保护气体进行试验,电弧旋转半径为 2 mm,角焊缝折线焊, A 点为示教起弧点, B 点为示教收弧点,折线角度为 120°,跟踪结果如图 10a 所示。摆动传感时示教路线为 AB 直线,起始点为 A 点,终点为 B 点,焊缝转折角度为 120°,如图 10b 所示。焊接时,当跟踪到 C 点,焊枪碰撞到试件,触发急停装置而停止焊接,这是由于焊缝转折角度过大,焊枪摆动频率过低,致使跟踪信号跟不上而引起的。

5 结论

试验结果表明,系统能够实现 MIG/MAG 焊、



(a) 旋转电弧的焊缝跟踪试验结果



(b) 摆动电弧的焊缝跟踪试验结果

图 10 电弧两种运动方式焊缝跟踪试验结果比较

V 形坡口的无静差焊缝纠偏,焊接质量和纠偏效果能够达到工艺要求,系统运行稳定,能够直接应用于大多数示教再现型弧焊机器人的焊缝纠偏,对提高弧焊机器人的智能性和适应性,推广旋转式电弧传感器在焊接中的应用具有较大的意义。

参 考 文 献

- 1 Sugitani Y, et al. Development of multi-electrodes automatic fillet welding equipment with high speed rotating arc process. NKK Technical Review, 1989(57): 33~36
- 2 潘际奎. 现代弧焊控制. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 3 廖宝剑. 以电弧为传感器的多自由度智能焊接系统研究: [博士学位论文]. 清华大学, 1993
- 4 吴世德. 电弧传感器焊缝跟踪的信息处理技术: [博士学位论文]. 清华大学, 1997
- 5 Kim J W, Na S J. A Self-organizing fuzzy control approach to arc sensor for weld joint tracking in gas metal arc welding of butt joints. Welding Research, 1993(2): 60~66
- 6 余锋. 弧焊机器人旋转电弧传感的焊缝信息处理技术研究: [硕士学位论文]. 南昌大学, 2001

STUDY ON INTELLIGANT OF THE TEACHING WELDING ROBOT BASED ON THE ROTATING ARC SENSOR

Zhang Hua

(Nanchang University)

Xiong Zhenyu

(Nanchang Institute of Aeronautical Technology)

Jia Jianping Pan Jiluan

(Nanchang University)

Abstract : In consideration of the shortcoming of the teaching arc welding robot, a real-time seam correction system based on (下转第 146 页)