

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.016

# SIMOTION D435 在搅拌摩擦焊接机中的应用\*

杨继东<sup>1</sup>, 林 正<sup>2</sup>, 蔺俊强<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆市光学机械研究所, 重庆 401123)

**摘要:** 针对目前我国搅拌摩擦焊设备的自主研发水平不高,大部分只能焊接一维直线或者无法恒压力控制的问题,设计了一套既能焊接二维曲线又可恒压力控制的搅拌摩擦焊设备。通过对搅拌摩擦焊接的焊接原理和控制要素的分析,在综合比较了各种控制方案后,选用了以SIMOTION D435为核心的控制方案;在对所需功能进行分析的基础上,控制程序采用模块式的编程方法,综合运用LAD语言和MCC语言,实现了搅拌摩擦焊接时的二维轨迹插补和压力PID控制,并对压力的控制精度和进给轴的定位精度进行了实验分析。研究表明,该系统运行稳定,压力控制精度高,适合于铝合金、镁合金等轻合金的二维平面的搅拌摩擦焊接。

**关键词:** SIMOTION D435; 搅拌摩擦焊接; 二维插补; PID控制

**中图分类号:** TH39; TG43; TP273 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2013)12-1515-05

## Application of SIMOTION D435 on friction stir welding machine

YANG Ji-dong<sup>1</sup>, LIN Zheng<sup>2</sup>, LIN Jun-qiang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Institute of Optics and Mechanics, Chongqing 401123, China)

**Abstract:** Aiming at the low independent research and development level of friction stir welding equipment in our country so far, most of them are only designed to achieve one-dimensional linear motion or not be constant pressure controlled, therefore, a set friction stir welding equipment which can both achieve two dimensional curve and do constant pressure control was designed. Through the analysis of the control elements and welding principle of friction stir welding, the SIMOTION D435 control scheme was selected after the comparison of various control schemes. Based on the analysis of the desired function, the modular programming method and the integrated use method of MCC language and LAD language were used in the control program. Then the two-dimensional interpolation and pressure PID control of friction stir welding were realized, and the pressure control accuracy and feed axis positioning accuracy experiments were carried out. The results indicate that the system runs stably and can achieve a high pressure control precision; it is suitable for 2D plane friction stir welding of light alloys such as aluminum and magnesium alloys.

**Key words:** SIMOTION D435; friction stir welding; two-dimensional interpolation; PID control

## 0 引 言

搅拌摩擦焊接是一种纯机械化连续的固相连接方法。它有着成本低、安全性高、节能无污染等优点,已被广泛应用于航空航天、交通运输等行业的镁、铝合金等各种合金的加工制造<sup>[1-3]</sup>。目前,我国搅拌摩擦焊设备的自主研发水平不高,大部分只能焊接一维

直线或无法恒压力控制,故研制开发一种能焊接二维曲线和恒压力控制的搅拌摩擦焊设备成为一种急切的需要。

本研究在消化、吸收现有的搅拌摩擦焊机技术的基础上,决定采用西门子运动控制系统 SIMOTION D435,以进一步对搅拌摩擦焊机的电控系统进行设计与优化。

收稿日期: 2013-06-13

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2010DEFR50010)

作者简介: 杨继东(1966-),男,重庆人,副教授,博士研究生,主要从事机电液混合智能传动与控制方面的研究。E-mail:yjd311910@126.com

## 1 搅拌摩擦焊简介

### 1.1 搅拌摩擦焊的工作过程

搅拌摩擦焊接的动作过程类似于数控铣床,工作原理图如图1所示。高速旋转的搅拌针首先缓慢插入焊缝处,待轴肩与工件接触后搅拌头再加压,同时向前进给,在此过程中,搅拌头与金属摩擦生热使金属处于塑性状态,然后向搅拌头后方流动形成致密焊缝。搅拌摩擦焊接的主要控制要素有:主轴的旋转速度及方向、轨迹的控制及焊接进给速度、主轴的顶锻压力、搅拌头的插入深度等。

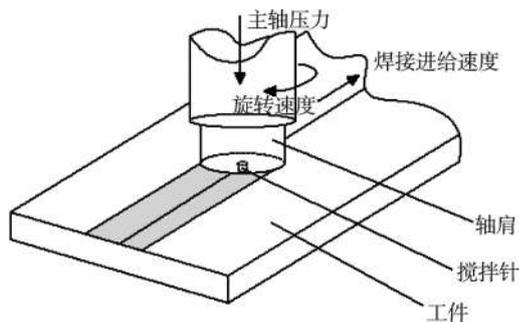


图1 搅拌摩擦焊的工作原理图

### 1.2 搅拌摩擦焊机的机械结构简介

搅拌摩擦焊接的主要控制要素与数控铣床非常相似,其与数控铣床最大的不同点是有较大的轴向恒定压力,从而使得在焊接过程中对机床的总体承重有较高的要求。故笔者设计的搅拌摩擦焊接机的机械结构参考定梁式静龙门铣床的机械结构,静龙门铣床的刚性较好,所能承受的主轴反向力较大。搅拌摩擦焊接设备与普通静龙门铣床的机械结构的区别在于,其在Z轴方向加装了一个比例阀控制的液压缸。故本研究设计的搅拌摩擦焊设备所需要控制的执行器件主要有:X轴电机、Y轴电机、Z轴电机、主轴电机,主轴液压缸。其主要的控制性能指标为:

- (1) 主轴转速的范围为20 r/min~1 600 r/min;
- (2) 主轴液压缸的恒压力的范围为0~3 t;
- (3) 在X-Y平面可做二维插补运动,运动定位精度保证在0.03 mm之内。

## 2 系统控制方案的选择

### 2.1 SIMOTION D435简介

SIMOTION系统是西门子推出的新一代运动控制系统。SIMOTION系统有着三大功能:逻辑控制功能(PLC)、运动控制功能(定位、插补、同步等)和工艺控制功能(压力、温度控制等)<sup>[4-7]</sup>。SIMOTION系统采用了模块化的设计,使用PROFIBUS和PROFINET实现

模块之间的通信,使SIMOTION运动控制系统具有很大的灵活性。SIMOTION强大的功能性使得其能够用一个系统完成所有的运动控制任务,也使之广泛应用于纺织、印刷,金属成型等领域。SIMOTION有3种硬件平台,包括基于控制器的SIMOTION-C、基于PC的SIMOTION-P和基于驱动的SIMOTION-D<sup>[8]</sup>。其中SIMOTION-D内部集成SINAMICS S120驱动控制单元,特别适合紧凑和模块化的设计<sup>[9]</sup>。SIMOTION-D有多种型号可供选择(D410、D425、D435、D445和D445-1),其中D410为单轴驱动器,不满足设计要求,而D4x5各型号之间的区别主要反映在:最大控制轴数、最小伺服/插补循环时钟、DRIVE-CLiQ接口数、价格。

### 2.2 系统控制方案的选择

搅拌摩擦焊接机除了同普通的数控铣床一样,要进行定位运动、插补运动等以外,还要进行焊接压力的控制,在设计中,焊接压力的控制由液压缸来实现,故在控制系统中需要额外精确控制一个液压缸。由于西门子数控系统SINUMERIK 802D是封闭式数控系统,不支持对外的PROFIBUS-DP通讯,其自身所带的可编程控制器所能额外添加的模块数也有限,故无法控制该设计所需要的液压缸。SINUMERIK 840D数控系统有外接的PROFIBUS接口,可以通过对外通讯来控制液压缸,但840D价格昂贵,经济性不高,同时开放性也没有SIMOTION D高,故该设计采用SIMOTION D系统,其既可以实现普通机床所需要的运动,又可以同时控制液压缸,同时经济性高、设计自由度高。

考虑到经济性,同时由于液压缸的压力PID控制对实时响应要求较高,本研究选择通讯周期较短且价格适中的SIMOTION D系列中的SIMOTION D435。其主要技术参数如表1所示。

表1 SIMOTION D435主要技术参数

安装技术	SINAMICS
通常控制轴数	1~16
最小伺服/插补循环时钟	1 ms
最小PROFIBUS周期	1 ms
集成I/O	8路输入,8路输出,可扩展
分布式I/O	ET200M/S/X,所有PROFIBUS标准子站
PROFIBUS接口	2路,2 Mbit/s,同步时钟
Ethernet接口	2路,100 Mbit/s
Drive-ClIQ接口	4路

## 3 系统的硬件设计

搅拌摩擦焊接机的电控系统主要由SIMOTION

D435(包括其SINAMICS S120各模块)、人机界面HMI、分布式I/O、执行器件及各种开关、检测传感器等构成,具体组成图如图2所示。

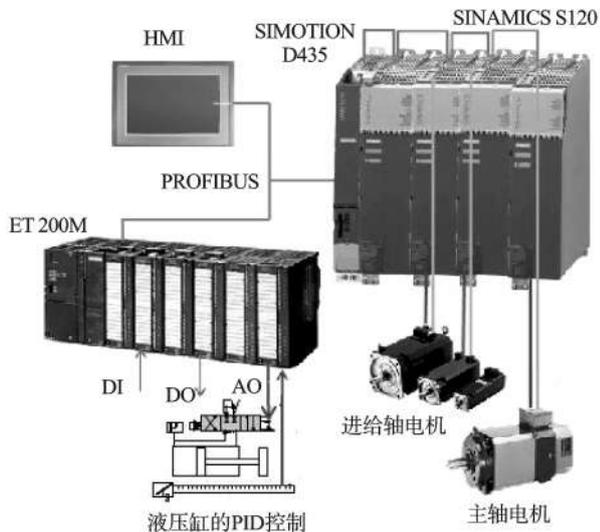


图2 电控系统硬件结构组成图

搅拌摩擦焊机的控制动作全部由SIMOTION D435控制器来控制完成,其各部分具体控制如下:

(1) 各进给轴电机和主轴电机的控制。SIMOTION D435和其SINAMICS S120伺服系统同时控制4个轴的同步响应。其中,SIMOTION D系统包括:1台SIMOTION D435控制器、1个电源模块、2个单轴电机模块、1个双轴电机模块。相互之间通过Driver-cliq电缆连接,由电机模块直接驱动和控制X轴、Y轴、Z轴以及搅拌主轴,且伺服电机的编码器反馈信号可通过Driver-cliq电缆反馈到电机模块。其中X轴和Y轴在硬件配置中需设置为带有path interpolation路径插补功能的轴,同时将两者链接分配到一个path object路径插补文件中。这样即可用程序实现X-Y平面的二维路径插补。

(2) 主轴液压缸的控制。分布式I/O ET200M作为SIMOTION的从站,扩充了SIMOTION系统的I/O点数,可充分发挥SIMOTION D的逻辑控制功能。在ET200M中添加的模拟量输入模块可以接收液压缸的位置和液压信号,输出模块可以控制液压缸的比例控制阀,这样通过ET200M和SIMOTION D435之间的高速PROFIBUS-DP通讯,SIMOTION D435的CPU即可对液压缸的位置和压力进行PID闭环调节,从而实现液压缸的位置控制和恒压力控制。

(3) 其他辅助设备的控制。夹具、润滑设施等辅助设备的控制是通过ET200M上的数字量输入输出模块的接受和处理后,再由SIMOTION D435中的程序来实现。此外,人机界面HMI也作为SIMOTION D的

PROFIBUS-DP通讯从站,可实现运动轨迹、旋转速度、焊接压力等参数的设置,以及用于各类参数的实时显示,也可进行各种操作。

## 4 系统的软件设计

### 4.1 系统的功能规划

同其他常用的控制系统一样,搅拌摩擦焊接机具备的功能主要有3大功能:回零功能、手动功能、自动功能:①回零功能,开机启动后首要完成的工作是对各个进给轴进行找零点,故不管在控制程序还是在界面程序设计上都是默认首先进入的;②手动功能,包括手动定位功能(可选择绝对坐标系或相对坐标系)、点动功能、以及手轮同步功能。这些功能只有在选择进入手动界面以后才能进行;③自动功能,即按照工艺动作的要求,在自动参数界面输入参数后,在各轴回零后,各运动轴按照工艺步骤自动进行。当然自动功能也分为单步、单周期和自动循环3种模式,可以任意选择。此外还有报警功能,也就是故障显示和确认的功能。这些功能在人机界面上的设计如图3所示。各个功能版块分别通过按下界面右上方的版块选择按钮即可进入。其中回零界面为开机默认界面。界面左上方为参数显示界面,界面左下方为主要参数设置界面,界面右中侧为控制按钮界面。界面右下方则为总控制开关界面,有开机运行、停止和复位按钮。



图3 搅拌摩擦焊接机HMI界面设计

### 4.2 系统的程序规划

根据上述主要功能,控制主程序的结构图如图4所示。其中回零程序的选择位在开机处理程序中默认置位,故回零程序为开机默认进入。当需要使用其他功能时,则通过HMI上的功能版块选择按钮进入。其中,HMI上右上方的3大功能版块选择按钮对应的就是程序中的版块程序选择位。当用户单击一个功能版块选择按钮时,则该功能程序选择位置位,同时当

前程序选择位复位,系统退出当前程序,进入所选择的程序。3大功能程序均分为逻辑处理程序和运动程序两大部分,其中逻辑处理程序用梯形图 LAD/FBD 编写,放在 background 任务里面,循环扫描处理<sup>[10]</sup>。运动程序主要用 MCC 语言编写,放到 motion task 任务里面,当需要用到时调用一次<sup>[11-13]</sup>。

除了3大功能程序以外,还有故障处理程序、开机处理程序、急停程序、关机处理程序等,其中故障处理程序可以对故障进行自动处理或提示,其可以放在 Scout 执行系统 execution system 中的 system interrupt task 任务里面,也可以放在 background 任务里面,具体看故障的类型和自己选择处理的方式而定。还有急停程序,将其放到 iposynchronous task 任务里面,因为该任务优先级较高,当用户按下急停按钮时,可以让其首先执行。开机处理程序和关机程序分别放在 Startup task 和 shutdown task 里面,只是在开关机时各执行一次,可以用作变量的初始化、工艺对象的复位、对象关机处理等等。

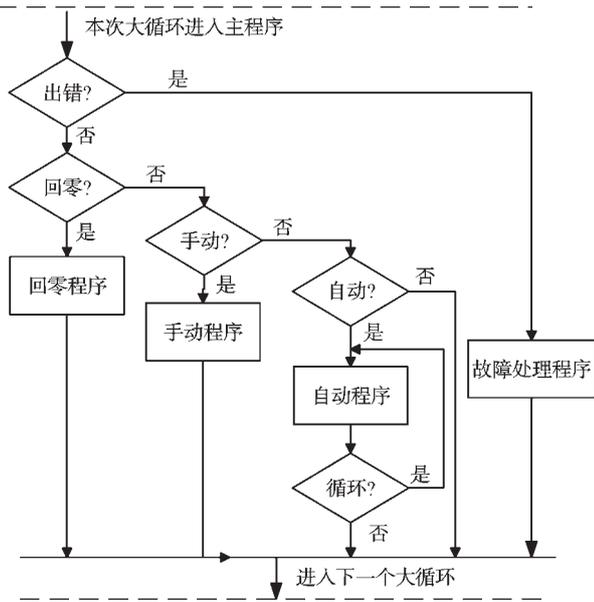


图4 搅拌摩擦焊接机的主程序结构图

### 4.3 系统的主要程序设计

#### 4.3.1 二维插补程序的设计

平面二维插补运动是通过插补程序实现的,插补程序单独分配到一个 motion task 里面,属于自动程序中的一部分。当自动程序运行中需要进行轨迹控制时,才调用该 task。插补程序主要采用 MCC 语言当中的插补指令来实现,插补指令分为直线插补、圆弧插补和多项式插补,可以按照焊接轨迹进行自由选择组合。

#### 4.3.2 液压缸PID程序的设计

液压缸的位移控制和压力控制是通过液压缸 PID 程序实现的。设计的 PID 程序主要通过 LAD 语言中

的\_ctrl\_pid 程序集成块来实现。当本研究把\_ctrl\_pid 程序块的各个参数设置好后,将整个 PID 程序分配到任务执行系统中的 TimerInterruptTasks 中。TimerInterruptTasks 在固定的周期内被循环触发,非常适合于闭环控制,其优先级高于 background task 和 motion task。只有把\_ctrl\_pid 程序块的\_en 和 enable 两个输入点置位后,每个周期内 PID 程序才执行\_ctrl\_pid 程序块,进而实现 PID 控制,否则只执行 PID 程序中的其他外围处理程序,而不执行\_ctrl\_pid 程序块,这两个位起到开关作用。液压缸的位移 PID 程序和压力 PID 程序每次只执行其中一个,相互之间的互锁和任意切换,可实现液压缸的位移控制或压力控制。

## 5 测试试验

为了验证控制方案的控制效果,本研究分别做了压力测试试验和进给轴定位精度测试试验。压力测试试验结果如图5所示。其压力调节响应速度快、精度高,稳态误差在1%以内。

进给轴定位精度采用激光干涉仪进行测试, X 轴的测试结果如图6所示。其定位精度 A 为 0.136 65 mm,其余两轴也均在 0.20 mm 以内,完全满足设计的

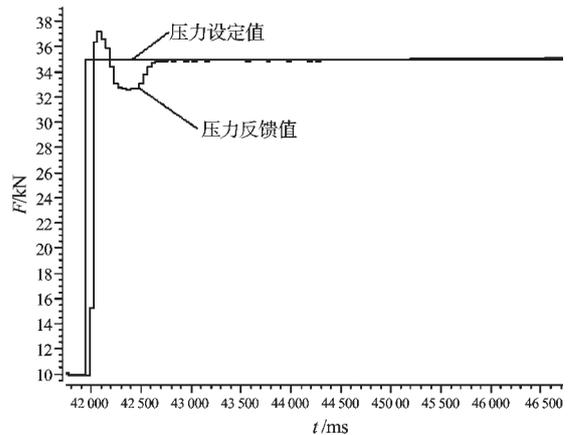


图5 主轴液压缸压力测试图

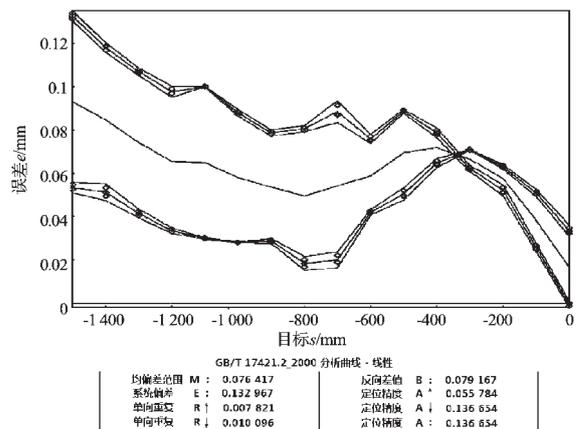


图6 X 轴定位精度测试图

要求。

## 6 结束语

SIMOTION D作为西门子新一代运动控制系统,该系统功能强大、灵活度高、且编程操作简便,特别是其插补、同步、工艺控制等功能足以有与NC竞争的能力。本研究以SIMOTION D435为控制器,研发了一台搅拌摩擦焊机,该设备已投入生产。

实际运行及实验结果表明,该种控制方法可以实现搅拌摩擦焊机的各种性能指标,并为以后的相关研究提供了参考依据。

### 参考文献(References):

- [1] 赵衍华,林三宝,吴林,等. 搅拌摩擦焊及焊接设备简介[J]. 电焊机,2004,34(1):7-11.
- [2] 马宗义. 搅拌摩擦焊与加工技术研究进展[J]. 科学观察,2009,4(5):53-54.
- [3] 方连军,刘晓娟,高献娟. 搅拌摩擦焊技术在航空航天工业中的应用[J]. 中国新技术新产品,2013,(13):89-90.

- [4] 宫悦,尤晨. SIMOTION D在饮料自动装箱系统中的应用[J]. 自动化技术与应用,2013,32(1):59-65,70.
- [5] 王顺菊,陈增礼. SIMOTION D在铝激光焊接技术中的应用[J]. 自动化应用,2013(1):69-71.
- [6] 王文华. 基于PLC控制的液动机械手[J]. 轻工机械,2012,30(2):46-49.
- [7] 吕俊. 基于OPC的PLC在线PIE模糊自整定系统[J]. 轻工机械,2013,31(2):35-39.
- [8] 西门子(中国)公司. SIMOTION 运动控制器基础应用手册[M]. 西门子(中国)公司,2010.
- [9] 西门子(中国)公司. SINAMICS\_S120 驱动器基础应用手册[M]. 西门子(中国)公司,2010.
- [10] 西门子(中国)公司. SIMOTION LAD\_FBD 编程和操作手册[M]. 西门子(中国)公司,2008.
- [11] 黄凯强,项占琴. SIMOTION D425在接箍上下料机械手上的应用[J]. 机电工程,2008,25(9):65-67,91.
- [12] 张有良,徐强,常晓煜,等. 码垛机械手运动轨迹的研究[J]. 包装与食品机械,2011(3):20-23.
- [13] 西门子(中国)公司. SIMOTION MCC 编程和操作手册[M]. 西门子(中国)公司,2008.

[编辑:张翔]

### 本文引用格式:

杨继东,林正,蔺俊强. SIMOTION D435在搅拌摩擦焊机中的应用[J]. 机电工程,2013,30(12):1515-1519.

YANG Ji-dong, LIN Zheng, LIN Jun-qiang. Application of SIMOTION D435 on friction stir welding machine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2013,30(12):1515-1519.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1505页)

条件下该方法的适应性和测量精度,据实验结果显示,2d-paul比2d-morlet连续小波获取的物体三维轮廓精度更高,被测物体高度分布在与光栅垂直方向上的梯度变化越来越大的情况下更适合,采用2d-paul算法能更有效地提高三维轮廓测量技术的测量精度。

### 参考文献(References):

- [1] ZHONG J, WENG J. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform Profilometry[J]. **Applied Optics**, 2004, 43: 4993-4998.
- [2] 周翔,赵宏. 基于Mexican hat小波变换的三维轮廓术[J]. 光学学报,2009,29(1):197-202.
- [3] 孙娟,陈文静,苏显渝,等. 小波变换轮廓术的测量范围研究[J]. 光学学报,2007,27(4):647-653.
- [4] Mallat S. 信号处理的小波导引[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [5] 黎海妹,陈建文. 一种改进的小波脊提取算法[J]. 通信技术,2010,43(4):61-64.
- [6] TOMASSINI P, GIULIETTI A, GIZZI L, et al. Analyzing laser plasma interferograms with a continuous wavelet trans-

form ridge extraction technique: the method [J]. **Applied Optics**, 2001, 40(35):6561-6568.

- [7] LIU H, CARTWRIGHT A, BASARAN C, et al. Experimental verification of improvement of phase shifting moiré interferometry using wavelet-based image processing[J]. **Optical Engineering**, 2004, 43(5):1206-1214.
- [8] KADOOKA K, KUNOO K, UDA N, et al. Strain analysis for moiré interferometry using the two dimensional continuous wavelet transform [J]. **Experimental Mechanics**, 2003, 43(1):45-51.
- [9] SANDOZ P. Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry [J]. **Optics Letters**, 1997, 22: 1065-1067.
- [10] ZAPPA E, BUSCA G. Comparison of eight unwrapping algorithms applied to Fourier-transform profilometry. [J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2008;46(2):106-116.
- [11] LIU H, CARTWRIGHT A, BASARAN C. Moiré interferogram phase extraction: a ridge detection algorithm for continuous wavelet transforms [J]. **Applied Optics**, 2004, 43(4):850-857.

[编辑:李辉]