

基于嵌入式 DSP 视觉伺服平台的 管道 MIG 打底焊焊缝成形控制

黄 操¹, 孙振国¹, 陈 强¹, 廖剑雄², 王定贺², 陈卫中²

(1. 清华大学 先进成形教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 昆山市华恒焊接设备技术有限公司, 江苏 昆山 215301)

摘 要: 针对坡口加工及焊接变形等因素引起的焊缝坡口宽度不确定性变化影响焊缝成形的问题, 建立了基于嵌入式 DSP(digital signal processor) 视觉伺服平台的管道 MIG 打底焊焊缝成形控制系统. 所设计的视觉伺服平台采用 TMS320DM642 实现焊接熔池区域图像的采集与处理, 采用 TMS320F2812 实现焊枪位姿和焊接工艺参数的实时调整. 设计了专门的图像处理算法, 分离并提取熔池、焊缝和焊丝的位置信息. 通过对焊缝坡口宽度变化的视觉检测, 实时调节焊接速度、焊枪摆动宽度和中心位置等参数, 获得了外观良好、X 光检验合格的焊缝成形.

关键词: MIG 打底焊; 视觉伺服; 嵌入式 DSP 系统; 熔池区域图像; 图像处理

中图分类号: TG409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)04-0041-04



黄 操

0 序 言

伴随着国民经济的持续发展、能源结构的重大改变和人们生活水平的稳步提高, 管道运输业在原油、成品油和天然气的储运中扮演着越来越重要的角色, 对管道建设过程中的焊接生产质量和效率提出了更高的要求^[1].

管道焊接通常包括坡口加工、对口、打底焊、填充焊和盖面焊等工艺流程^[2]. 为实现单面焊双面成形, 一般采用焊条电弧焊或 TIG 焊打底^[3,4]. 然而, 焊条打底焊的操作难度大、成形往往不稳定, TIG 焊虽然成形好, 质量可靠, 但生产效率低. MIG/MAG 焊工艺具有生产效率高, 便于操作, 变形小, 容易实现单面焊双面成形, 适合于各种厚度板材等工艺特点而受到广大焊接工作者的重视. 受焊接电源软、硬件条件的限制, 传统的 MIG/MAG 焊工艺并未能在管道打底焊中得到广泛应用^[5].

KEMPPI 公司推出了一种用于结构钢和不锈钢的 MIG/MAG 打底焊和薄板焊接改进的短弧焊接新工艺 Fast ROOTTM. 采用数字化技术提升焊接电源动态性能, 通过对电流、电压波形的控制改善焊缝成

形, 获得了良好的打底焊焊道表面和背面成形, 而且同一台设备可以实现打底焊和填充焊, 焊接速度和生产率大大高于 TIG 焊^[6].

然而, 仅仅依赖于焊接电源和焊接工艺, 并不能很好地解决管道焊接打底焊工艺流程中坡口加工、对口以及焊接变形等因素造成的焊缝坡口宽度的不确定性变化问题. 为此, 建立了一套基于嵌入式 DSP 视觉伺服平台的管道 MIG 打底焊焊缝成形控制系统, 提出并实现了一种对焊缝区域进行实时监控并根据坡口宽度、焊丝位置等特征参量实时调整焊接工艺参数和焊枪摆动中心位置, 以获得良好的打底焊焊缝成形的新方法.

1 系统组成与工作原理

如图 1 所示, 管道 MIG 打底焊焊缝成形控制系统由变位机、焊枪位姿调整机构、MIG 焊枪、嵌入式 DSP 视觉伺服平台、光学系统、工业 CCD 摄像机、焊接电源、图像监视器等组成. 待焊工件固定于变位机上, 由变位机带动实现旋转运动. MIG 焊枪、CCD 摄像机、光学系统和 DSP 视觉伺服平台都固定在焊枪位姿调整机构上. 焊枪位姿调整机构由十字滑块、2 个步进电机及其驱动单元组成, 可以在步进电机控制下调节焊枪高度和焊枪横摆的形式、速度和

位置参数。系统采用 EWM 公司的 PHOENIX 4L 焊接电源, 选用嘉恒中自公司的 OK-AM1100 的黑白工业摄像机(曝光时间设定为 $1/500$ s, PAL 制图像输出)。焊接试件是外径为 180 mm、厚度为 12 mm 的 20 钢管, 35° V 形坡口, 坡口宽度在 2~6 mm 范围内变化, 每隔 120° 有一个点固点。

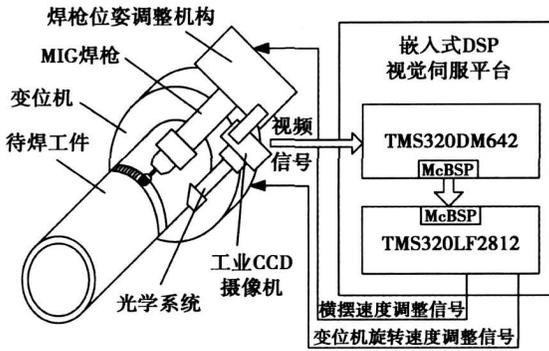


图 1 管道 MIG 打底焊焊缝成形控制系统组成框图

Fig. 1 Schematic of seam formation control system for root pass MIG welding of pipeline

嵌入式 DSP 视觉伺服平台由两片 TI 公司的 DSP 芯片为核心构成, 其中的 TMS320DM642 主要用于视觉图像采集与特征信息提取, TMS320F2812 用于焊接工艺参数调整和多轴运动机构协调控制, 双 DSP 之间的数据交换通过 McBSP 接口进行。该平台采用功能单元模块化设计思想和叠层积木式装配结构, 在 $170\text{ mm} \times 57\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的空间尺寸内集成了包括图像处理、运动控制、模拟/数字相机接口、模拟/数字视频输出和电源变换等功能模块。根据用户所关注的焊接熔池区域图像特征信息不同, 该平台既可以驱动焊枪位姿调整机构实现弧长控制和焊缝跟踪, 也可以通过调节焊接电流、电弧电压、速度等焊接工艺参数来控制焊缝成形。配以合适的光学系统和相应的图像处理算法, 该平台可以推广应用于 MIG, TIG 和 CO_2 等多种焊接工艺方法的焊接过程监控、焊缝跟踪和焊缝成形实时控制。

系统工作原理: 首先通过手控盒调节焊枪位姿, 使得 MIG 焊枪位于焊缝中心且高度合适。随后开启焊接电源并启动变位机带动工件作旋转运动, 开始焊接。由 TMS320DM642 实时采集 CCD 摄像机拍摄的焊接熔池区域的视频图像, 并根据所设计的图像处理算法, 从熔池区域图像中提取熔池前端焊缝坡口宽度、焊枪摆动宽度和对中信息。在此过程中, TMS320DM642 一方面将相关信息标示在熔池区域图像上, 并动态显示在图像监视器上, 供施焊人员

实时监控整个焊接过程。同时 TMS320DM642 还要将所获取的图像特征信息通过 McBSP 总线传送给 TMS320F2812, 由它根据所设计的控制策略, 输出相应的焊接速度调整信号给控制变位机旋转速度的直流电机驱动器, 或者输出相应的焊丝横摆宽度调整信号给焊枪位置调整机构中的横摆步进电机驱动器, 实时调节焊接速度、焊枪摆动宽度和中心位置, 实现基于视觉感应的管道 MIG 打底焊焊缝成形控制, 直到焊接过程结束。

2 熔池区域图像处理算法

针对 2~6 mm 焊缝的坡口宽度, 采用焊接电流为 108 A、焊接速度为 $178 \sim 126$ mm/min、横摆速度为 1200 mm/min、横摆宽度为 5~8 mm、边缘停留时间为 0.45 s 的参数进行工艺试验。利用 TMS320DM642 采集不同坡口宽度时的 MIG 打底焊熔池区域图像, 并通过 USB 接口将图像数据上传给计算机。在计算机上借用 MATLAB 等工具软件设计相应的图像处理算法。然后, 将该算法移植到 TMS320DM642 中, 脱离计算机, 由嵌入式 DSP 视觉伺服平台完成管道 MIG 打底焊焊缝成形控制。

图 2a 给出了焊缝坡口宽度为 5 mm 时的典型 MIG 打底焊熔池区域图像, 其大小为 720 像素 \times 288 像素, x 轴方向分辨率为 0.09 mm/像素, y 方向分辨率为 0.09 mm/像素。对于既定的图像获取系统, 焊缝位置和焊丝与熔池间的相对位置基本固定。熔池在所获得的图像中的亮度较高, 特征较为明显。在确定了熔池区域后, 选取熔池区域的上下限之间、熔池区域的左侧 150 像素点宽度所构成的图像区域作为焊缝位置的检测区间, 选取熔池区域右侧 50 像素点宽度的图像区域作为焊丝位置的检测区间。

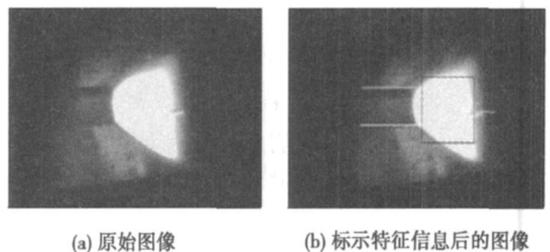


图 2 典型的 MIG 打底焊熔池区域图像

Fig. 2 Weld pool area image of root pass MIG welding

2.1 熔池位置检测

对多幅图像分别进行灰度极值搜索, 结果发现最大灰度值点一般都处于熔池区域内。因此, 采用

0.9倍灰度极值为门限,对全图进行二值化,然后分别沿图像的x轴和y轴方向作直方图(图3)。将图3中直方图峰值的一半作为门限,可以在直方图上获得 x_1, x_2, y_1, y_2 这4个特征点,从而在熔池区域图像中获得一个矩形区域(图2b)。

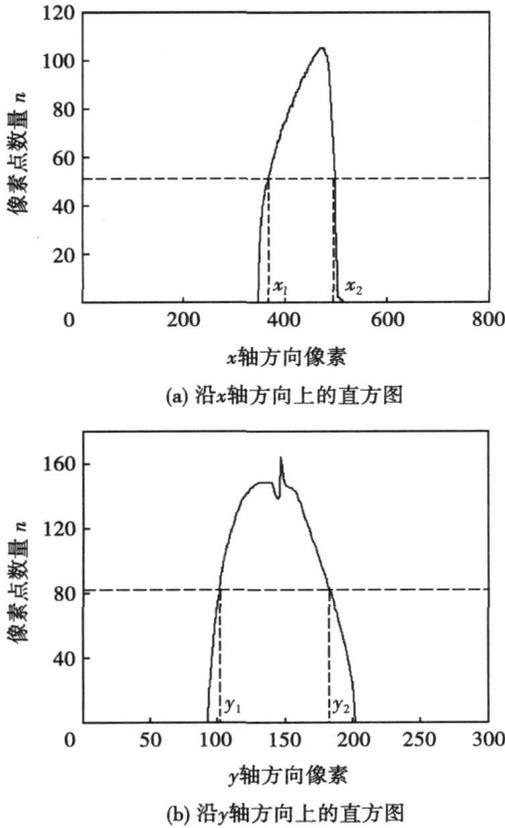


图3 图2a二值化后的直方图

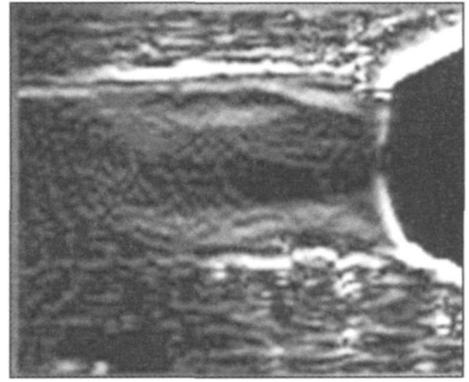
Fig. 3 Histogram of Fig. 2a after being binarized

2.2 坡口宽度检测

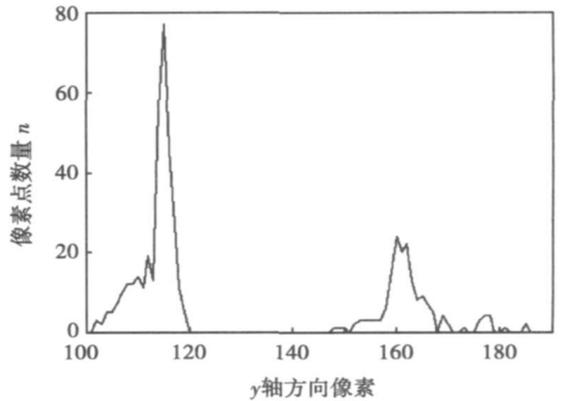
待焊焊缝由两条棱线构成,其灰度特征并不明显,仅仅通过灰度值大小无法直接提取出焊缝棱线的位置信息。从图2a可以看出,两侧的坡口有较为明显的反光,焊缝内部区域透光无反射本应呈现黑色,但存在焊接烟尘的反光而并非呈现纯黑色。进一步观察焊枪摆动过程中在坡口的不同位置获取的熔池区域图像,发现坡口和焊缝内部区域在反光强度上存在差异是一个较为稳定的特征。经过比较,选用式(1)所示的Sobel算子对焊缝位置检测区间进行边缘特征增强,结果如图4a所示。

$$S_y = \begin{bmatrix} -0.125 & -0.25 & -0.125 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.125 & 0.25 & 0.125 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将图4a沿y轴方向绘制直方图,由表征焊缝棱线坐标的两个峰值(图4b)提取坡口宽度信息。



(a) Sobel处理后的图像



(b) 沿y轴方向的直方图

图4 焊缝位置信息检测

Fig. 4 Detection of welding seam position

2.3 焊丝位置检测

为了获取焊枪摆动焊接过程中焊枪摆动中心与焊缝的对中情况,需要实时提取焊丝位置。选取焊丝在多幅图像中所能到达的上下极限位置之差作为焊枪摆动宽度信息,上下极限位置的均值作为焊枪摆动中心位置。焊丝位置检测的流程与焊缝位置检测类似,不再赘述。

3 工艺试验

3.1 图像处理速度与坡口宽度检测误差测试

对约5000幅熔池区域图像进行特征信息提取速度测试,结果表明TMS320DM642的单幅图像处理时间小于40ms。采用2.2节所述的坡口宽度检测算法,分别对2~6mm坡口宽度进行检测,所得结果及误差如表1所示(每组数据是约5000幅图像处理结果的平均)。系统实际应用中焊枪抖动会对取像产生一定的影响,造成偶尔几幅图像处理提取出的坡口宽度信息出现突变的问题,针对性地采用滚动方式将100幅图像的处理结果求平均值后输出(即用第101幅图像取代第1幅图像,并依次类推)。

表1 坡口宽度检测误差

Table 1 Detection errors of groove width

组号	实际值 h_1/mm	平均测量值 h_2/mm	平均绝对误差 h_3/mm	平均相对误差 $\mu(\%)$
1	2.0	1.9	-0.12	4.1
2	3.0	2.8	-0.16	3.9
3	4.0	3.8	-0.19	4.1
4	5.0	4.8	-0.23	4.9
5	6.0	5.7	-0.28	5.3

3.2 坡口宽度—焊接速度—横摆宽度参数匹配控制

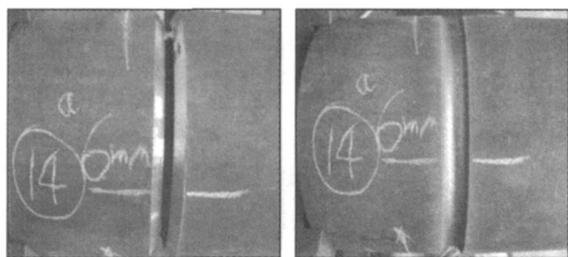
焊接速度和坡口宽度有一定的对应关系。焊缝窄,相同焊接电流下,加快焊接速度可保证相对一致的焊缝填丝量,反之亦然。当同一条焊缝的坡口宽度变化大于4 mm时,单纯地调节焊接速度,焊缝成形不稳定。为此,进行了坡口宽度—焊接速度—横摆宽度的参数匹配控制试验,得到表2所示的参数匹配关系(焊接电流为108 A、横摆速度为1 200 mm/min、边缘停留时间为0.45 s)。

表2 坡口宽度—焊接速度—横摆宽度匹配控制参数表

Table 2 Synergic control parameters of groove width, welding speed and swing width

编号	坡口宽度 h/mm	横摆宽度 H/mm	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$
1	2	4	178
2	3	5	170
3	4	6	155
4	5	7	140
5	6	8	126

采用表2的匹配控制参数,进行了十几个变焊缝间歇工件的焊接工艺试验,均获得了良好的焊缝成形(图5),焊缝外形美观,X光检验合格。



(a) 点固后的工件

(b) 打底焊后的工件

图5 MIG 打底焊焊缝成形

Fig. 5 Weld seam formation of root pass MIG welding

4 结 论

(1) 建立了一套基于嵌入式 DSP 视觉伺服平台的管道 MIG 打底焊焊缝成形控制系统,既能实现焊接过程图像监控,也能根据图像特征信息,实时调节焊接工艺参数,控制焊缝成形。

(2) 设计了专门的图像处理算法,成功分离并提取熔池、焊缝和焊丝的位置信息,在焊缝检测精度和图像处理速度上,满足控制系统对焊接速度和焊枪横摆宽度调整的实时性要求。

(3) 建立了与不同的坡口宽度相对应的焊接速度、焊枪横摆宽度控制参数匹配关系,在坡口宽度为2~6 mm 范围内变化且存在一定错边的情况下,成功实现了管道 MIG 打底焊焊缝成形控制,焊缝成形美观,X光检验合格。

参考文献:

- [1] 陈浩. 管道自动焊接技术[J]. 油气储运, 1998, 17(7): 39-41.
Chen Hao. Automatic welding technique for pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1998, 17(7): 39-41.
- [2] 刘古文, 于辉, 庞贵瑞, 等. 管线预制自动焊设备及焊接工艺[J]. 焊接, 2000(9): 23-24.
Liu Guwen, Yu Hui, Pang Guirui. Automatic welding equipment and procedure for pipeline[J]. Welding & Joining, 2000(9): 23-24.
- [3] 高棋, 赵明霞. 浅谈钨极氩弧焊在长输管道打底焊中的应用[J]. 现代焊接, 2006(2): 43-44, 46.
Gao Qi, Zhao Mingxia. On the application of TAW in backing welding of the long pipeline[J]. Modern Welding Technology, 2006(2): 43-44, 46.
- [4] Postlethwaite, Deanna. Technology gets to the root of pipe welding[J]. Welding and Cutting, 2007, 6(5): 246-247.
- [5] 曲孟盛, 刘裕升. 工艺因素对 MAG 焊打底成型的影响[J]. 焊接, 1985(2): 5-8, 21.
Qu Mengsheng, Liu Yusheng. Influences of process factors on seam formation of root pass MAG welding[J]. Welding & Joining, 1985(2): 5-8, 21.
- [6] Uusitalo, Jyri. Modified short arc process—a new way of welding root passes[J]. Welding in the World, 2007, 51(S1): 283-290.

作者简介: 黄操,男,1982年出生,硕士研究生. 主要研究方向为光机电一体化技术及应用. 发表论文3篇.

Email: chduang@gmail.com

perature distributions of different scanning modes are studied and analyzed. Based on the experimental and simulation results circle scanning orderly with degressive radius from outer to inner is suitable to produce a certain width cylinder, while small electron beam current can reach temperature above the melting point. And the scanning range is consistent with the melting scope, melted powder in the depth is almost the same for the entire scanning area, so the prototyping result is uniform and the surface is flat. The temperature field of multi-layered scanning with element birth and death is predicted by simulation, and the simulation result is useful to instruct practical prototyping.

Key words: electron beam rapid prototyping; element birth & death; temperature field simulation

Mathematical model of the distribution of spot welding temperature field based on current skin effect TANG Yuanzhi (Mechanical department, Hubei Institute of Automotive Industries Shiyuan 442002, Hubei, China). p38-40

Abstract: In this paper, mathematical model of temperature field was set up through the heat conduction equation in the current skin effect. This process of solving was simplified, the results are accurate, the physical meanings are clear and direct viewing. The results show that spot weld nugget is oval-shaped, therefore the current skin effect enlarges the spot welding area, thus increases its solidity and helps to curb the explosion of the spot weld nugget and splash. The results indicate that by changing the current frequency to adjust thickness of the current trend skin, the size of the spot weld nugget can be regulated. Under the guidance of the theory, the quality of the spot weld nugget can be improved, the structure of electrode is optimized and new weld machine is developed. The theoretical result has a great value in the engineering practice.

Key words: spot welding; current skin effect; temperature distribution; spot weld nugget

Weld seam formation control of root pass for pipeline MIG welding based on an embedded DSP visual servo platform

HUANG Cao¹, SUN Zhenguo¹, CHEN Qiang¹, LIAO Jianxiong², WANG Dinghe², CHEN Weizhong² (1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Huaheng Welding Equipment & Technical Co. Ltd. Kunshan 215301, Jiangsu, China). p41-44

Abstract: In the root pass of pipeline MIG welding, the un-predicted gap variation of weld seam caused by groove-preparing or welding deformation has extremely significant influence on the quality of weld seam. For this reason, a weld seam formation control system based on an embedded DSP (digital signal processor) visual servo platform was established. In the visual servo platform, TMS320DM642 has been used to grab and process the image in the weld pool area and TMS320F2812 has been used to accomplish real-time adjusting of welding torch posture and welding parameters. With a particularly designed image processing algorithm, the position information of weld pool, the weld seam and feeding wire were de-

tached and calculated successfully. Then, according to the visual sensing results of weld seam width, real-time control of weld seam formation of root pass of pipeline MIG welding was fulfilled through the online regulation of welding parameters. X-ray test qualified weld seams with good appearance are obtained.

Key words: root pass MIG welding; visual servo; embedded DSP system; image of weld pool area; image processing

Mechanical properties of 1420 aluminum-lithium alloy friction stir welding GUO Xiaojuan, LI Guang, DONG Chunlin, LUAN Guohong (China FSW Center, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China). p45-48

Abstract: The friction stir welding of 2.8 mm thick 1420 aluminum-lithium alloy was conducted. The mechanical property and microstructure of the joints as well as the influences of welding parameters were investigated. The results show that if the welding parameters are optimal, the tensile property and elongation of the joints can reach to 90% that of the base metal, and the higher heat input could improve the mechanical properties. SIM and microhardness analysis indicate that fracture surface was characterized by main cleavage and dimples. Compared with other area, the hardness in weld was higher, and the highest area was in the center of the weld. The maximum is the TMAZ area at the retreating sides. The microstructure behaves the 'S' characteristic.

Key words: friction stir welding; aluminum-lithium alloy; mechanical property; microstructure

Microstructural characteristic of rapid solidification welding joint of melt-spun Cu-Sn peritectic alloy foils ZHAI Qiuya,

YANG Jinshan, XU Feng, XU Jinfeng (School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China). p49-52, 56

Abstract: The rapid solidification welding of melt-spun Cu-x%Sn (x=7, 13, 5, 20) alloy foils is conducted by a micro-type capacitor discharge welding machine and the microstructural morphology of joint is investigated. The cooling rate of micro nugget is calculated and the formation of porosity in nugget is analyzed theoretically. The results indicate that the capacitor discharge welding can realize the rapid solidification welding of melt-spun Cu-Sn alloy foils. The microstructure of joint is characterized by rapid solidification which consists of fine and homogeneous equiaxed grains. The cooling rate of nugget is up to 10⁷ K/s and the welding period is merely 15.5 μs. Therefore, the joint microstructure is in accordance with the rapidly solidified alloy foils. The main welding defect is porosity. With the increase of Sn content, the porosity of nugget increases.

Key words: melt-spun Cu-Sn peritectic alloy foils; rapid solidification welding; microstructure of joint

Microstructure and properties of arc sprayed coatings containing Fe-based amorphous phase FU Binyou^{1,2}, HE Dingyong¹,

ZHAO Lidong², LI Xiaoyan¹ (1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124,