

大型构件水下焊接机器人系统

叶艳辉¹, 张 华¹, 潘际奎^{1,2}, 高延峰¹, 郑 军²

(1. 南昌大学 江西省机器人与焊接自动化重点实验室, 南昌 330031; 2. 清华大学 机械工程学院, 北京 100084)

摘 要: 针对水下焊接环境要求,设计了一种履带式水下焊接机器人系统,该系统由机器人本体机构、激光视觉传感器、控制系统和焊接系统组成。机器人本体机构由履带式移动平台和焊枪调节机构构成,运动灵活可靠,满足水下焊接焊缝跟踪要求。完成了视觉传感器部件选型及光路设计,实现水下环境的焊缝自动识别。设计了基于 PLC 机器人控制系统和协调控制方法,实现水下环境的焊缝跟踪控制。同时在水下焊接试验平台完成焊接跟踪试验。结果表明,机器人运行稳定,焊缝成形较好,焊接质量满足要求。

关键词: 水下焊接机器人; 激光视觉传感器; 焊缝跟踪; 协调控制

中图分类号: TG 434.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)11-0041-04

0 序 言

随着用于海洋运输和海底开发的大型船舶、海底石油管道、海底钻井平台等的快速增加,这些结构的建造和维修都离不开水下焊接技术。水下焊接是在被焊工件焊缝坡口完全处于水环境中进行的特种焊接,国内外技术人员为了克服水下环境引发的各种焊接问题,研究出了湿法、局部干法、干法等多种水下焊接方法。哈尔滨焊接研究所^[1]相继建立了 HSC-1 和 HSC-2 等两个模拟试验加压舱,研究了 0~5 kPa 压力下的电弧特性和焊接接头力学性能。Pandey 等人^[2]研究了高压干法无气体保护焊接(MMA 焊)对典型海洋结构材料的力学性能和高压焊缝金属化学成分的影响。日本焊接研究所^[3]在高压舱内安装行走小车,通过操作焊枪移动进行焊接试验,研究了高压干法对焊接过程的影响。北京石油化工学院^[4,5]在高压舱内采用局部干法对模拟水下环境 MIG 和 TIG 的焊接过程进行研究。

从以上研究成果可知,国内外针对水下焊接的研究,主要集中于对水下压力环境下的焊接工艺试验研究,并未完成水下机器人焊接设备开发。目前针对水下焊接环境开发焊接设备,其主要需解决以下问题:一是需设计可靠的水下机器人移动和跟踪机构;二是需解决水下焊缝识别问题。通过结合机器人与水下焊接技术,开发了一种新型水下局部干

法焊接机器人系统。该系统由焊接机器人和焊接系统两大部分构成,可实现水下环境的焊缝自动跟踪。

1 系统构成及工作原理

根据水下焊接的要求,所设计的水下焊接机器人系统由机器人本体机构、激光视觉传感器、控制系统和焊接系统组成。机器人本体机构为所有功能组件的支撑平台,承载激光视觉传感器、焊枪和送丝机等设备,抵达工作位置。机器人水下运动机构采用气体动密封形式,即高压气体输入机器人内部进行密封,同时高压气体还在焊接局部罩内形成局部无水焊接作业区,实现水下局部干法焊接。控制系统在焊接过程中完成数据处理及驱动电机控制,完成焊缝识别和自动跟踪;焊接系统包括气瓶、焊接电源、送丝机、焊枪、局部罩及其附属的供气系统等。水下焊接机器人系统如图 1 所示。

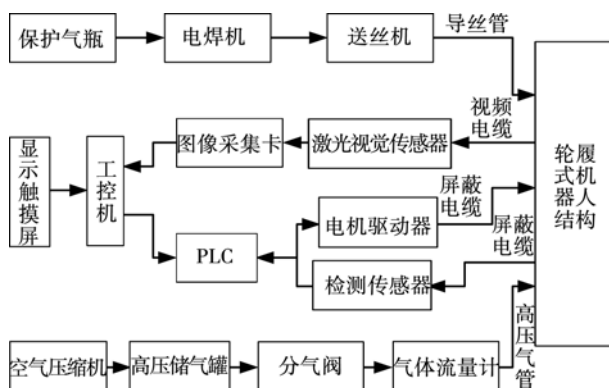


图 1 水下焊接机器人系统

Fig. 1 System of underwater welding robot

收稿日期: 2014-03-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2007AA04Z242); 国家自然科学基金资助项目(51465043); 江西省自然科学基金资助项目(20114BAB206007)

机器人底盘机构采用履带复合式结构,履带上安装永磁体,用于使机器人吸附于工件上,提高机器人稳定性.为了减轻质量,机器人整体采用铝合金,部分关键部件采用了不锈钢;为了提高机器人水下运动可靠性,在底盘主要运动部件使用内加压主动密封方式.在此底盘上,安装有控制焊枪与局部罩位置的横向调节机构与纵向调节机构.其中横向调节机构直接安装于底盘上,滑块可以沿着垂直于底盘轴线的方向运动,调节安装在其上的局部罩和焊枪相对于焊缝运动.在横向调节机构上安装有两个纵向调节机构,焊枪和局部罩分别安装在这两个机构上,用于调节焊枪和局部罩的高度.图 2 为水下焊接机器人物理样机.

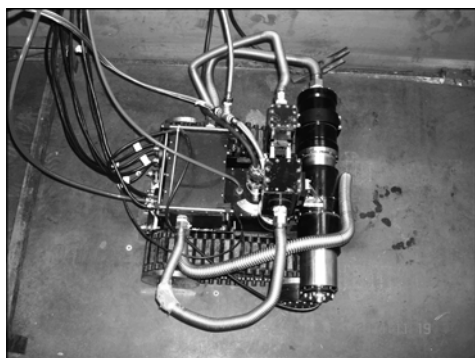


图 2 水下焊接机器人物理样机

Fig. 2 Physical prototype of underwater welding robot

其工作模式分为手动和自动两种,其中手动模式是在焊接作业前,操作人员能够在控制柜的人机交互界面上,调整机器人到焊缝位置;自动模式为当焊接机器人找到被跟踪焊缝后,打开焊接跟踪模块,通过激光视觉传感器识别的焊缝偏差信息,把偏差数据输入到控制器中,控制各驱动电机转速,从而调节机器人位置和姿态,实现焊接机器人初始位姿调整,然后起弧焊接,自动完成焊缝焊接跟踪.

2 水下激光视觉传感器系统设计

在水下焊接中,由于采用局部干法进行焊接,同样存在大量的弧光和飞溅以及电磁干扰.为了能准确识别水下焊缝,需完成激光视觉传感器各部件选型,并对光路进行设计.

2.1 激光视觉传感器的器件选型

通过分析气体保护焊的弧光光谱可知,在 600 ~ 700 nm 波长区间内,弧光成分相对较低.为了降低焊接过程中弧光对图像干扰,选择波长为 650 nm 的半导体激光器,主要技术参数如表 1 所示.

表 1 半导体激光器的主要技术参数

Table 1 Technical parameter table of semiconductor laser

| 标称波长 λ/nm | 出瞳功率 P/mW | 线宽 L/mm | 外形尺寸($d \times l$) $/(\text{mm} \cdot \text{mm})$ | 工作温度 $T/^{\circ}\text{C}$ |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------|--|------------------------------|
| 650 | 60 | <0.5 (10 cm 处) | $\Phi 14 \times 50$ | $-20 \sim 70$ |

由于焊接时产生的强烈弧光强度要远大于激光强度,甚至淹没激光信号,为了降低弧光干扰,设计在 CCD 摄像头前增加由干涉滤光片、中性滤光片和偏振片组成的滤光系统,使激光波长范围的光通过,从而抑制大部分弧光干扰.

在 CCD 摄像头选型方面,由于色彩焊缝识别无影响,可选择黑白摄像头,且要求其体积和畸变因子小,保证跟踪精度和安装方便.

2.2 传感器的光路设计

根据视觉传感器设计基本原理,激光器和 CCD 摄像机两者之间的轴线需成一固定角度,为了方便更换器件和减少传感器整体体积,设计的传感器中 CCD 和激光器的位置关系如图 3 所示.

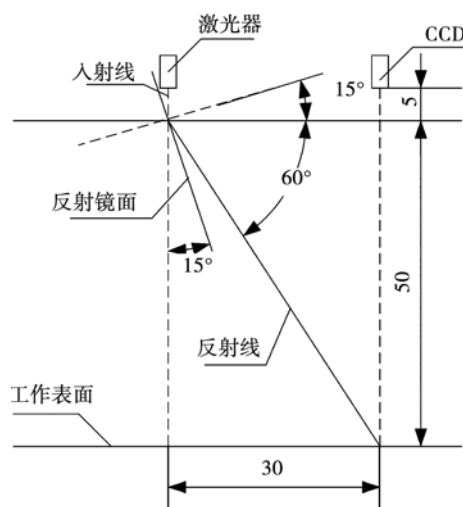


图 3 CCD 和激光器的位置关系 (mm)

Fig. 3 Position relationship between CCD and laser

激光器轴线与 CCD 光轴平行安装,激光器发射的一字线性光经与轴线成 15° 的镜面反射到工件表面;激光器轴线与 CCD 轴线之间的距离为 30 mm,激光器下端与反射镜光线入射点处的高度为 5 mm,激光发射端离工件表面高度为 50 mm;CCD 感光区面积为 3.6 mm × 2.7 mm,有效像素为 500 像素 × 582 像素,镜头焦距 f 为 3.8 mm. 从图 3 可以看出,激光器安装在距离工件高度 h 为 55 mm 时,激光光线基本位于 CCD 中心正下方,充分利用到了 CCD 的可视范围,具有很高的分辨率.

基于上述安装位置和角度,根据图 3 所示的几

何关系,可得到 CCD 摄像机的可视范围即

$$X_H = \frac{hC_H}{f} = 52.1 \text{ mm} \quad (1)$$

$$X_V = \frac{hC_V}{f} = 39.1 \text{ mm} \quad (2)$$

式中: X_H 为水平方向可视范围; X_V 为垂直方向可视范围; C_H 为感光区长度; C_V 为感光区宽度。

理论上可达到的最高分辨精度为

$$P_H = \frac{X_H}{H} = 0.10 \text{ mm/pixel} \quad (3)$$

$$P_V = \frac{X_V}{V} = 0.07 \text{ mm/pixel} \quad (4)$$

式中: P_H 为水平方向分辨精度; P_V 为垂直方向分辨精度; H 为感光区长度方向像素; V 为感光区宽度方向像素。从以上数据可以看出,水平方向和垂直方向都满足焊缝跟踪精度要求。

3 机器人控制系统设计

3.1 控制系统硬件结构

控制系统采集各传感器的信号并进行数据处理,协调机器人各部件的运动控制,主要包括机器人底盘、焊缝跟踪机构、焊枪和局部罩高度调节机构,控制系统结构如图 4 所示。在自动焊接过程中,激光视觉传感器从现场获取到焊缝坡口的图像信息,经过图像处理获得焊缝的中心位置坐标,通过串口通信方式传递给可编程控制器 PLC,然后按照控制算法计算并输出控制量给车轮及滑块电机驱动器,控制机器人底盘和滑块运动。

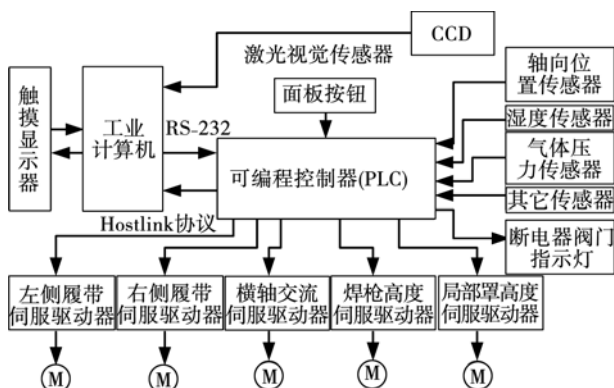


图 4 水下机器人控制系统硬件结构

Fig. 4 Hardware structure of control system for underwater welding robot

3.2 系统控制策略

由于机器人车体底盘质量大,系统惯性较大,且

履带具有很强的磁块吸力,使得底盘机构运动响应速度较慢,运动控制特性不好。而滑块机构质量轻,移动灵活,响应速度快,且为线性运动过程,可控制性较好,可控精度高,其缺点是运动行程受限^[6]。图 5 为机器人协调跟踪控制方法。图 5 中 H 代表横向滑块,V 代表纵向滑块。

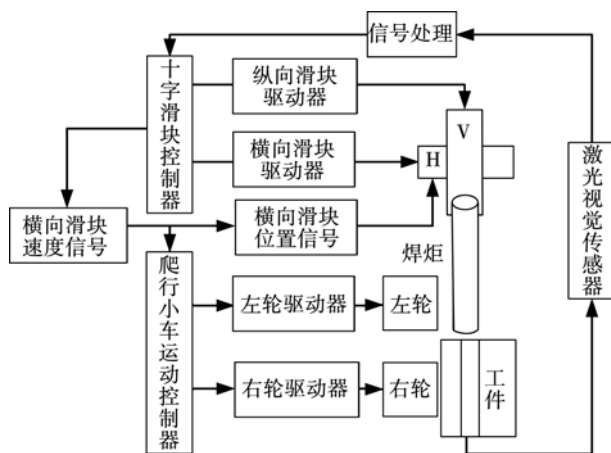


图 5 水下机器人控制方法

Fig. 5 Control method for underwater welding robot

激光视觉传感器先将焊缝偏差信号用于滑块跟踪系统的控制,进行实时微调精确跟踪,再将横向滑块的位置信号和速度信号反馈给车体底盘运动控制系统,使底盘跟踪焊缝轨迹,以免跟踪范围变大时,横向滑块到达极限位置而使跟踪失败。该方法充分利用机器人车体大范围移动性和稳定性,又结合滑块运动的灵活性和可控性,使机器人可大范围的跟踪焊缝,并获得很高的跟踪精度。

4 水下焊缝跟踪试验

为了验证机器人水下焊缝跟踪性能,在 2.5 m × 2.0 m × 1.8 m 的试验水箱中进行模拟水下焊接环境试验(图 6),试验工件为直线焊缝(V 形坡口)与机器人初始位置角度小于 15°,采用横向滑块与车体底盘协调控制方法,完成焊缝跟踪。焊接工艺为:焊丝伸出长度 15 mm,焊接电流 160 A,电弧电压 24.5 V,焊接速度 8 cm/min,保护气体 80% Ar + 20% CO₂,保护气体流量 25 L/min,水深 1.5 m,局部罩内高压气体压力为 0.3 MPa。

从图 7 焊接跟踪结果可以看出,机器人底盘和滑块协调控制很好,无运动干涉,小车转弯平缓,焊缝跟踪过程平缓,并无抖动,焊缝成形较好,没有出现咬边现象,跟踪精度较高,满足水下焊接质量要求。



图 6 水下焊接机器人现场试验

Fig. 6 Field experiment of underwater welding robot

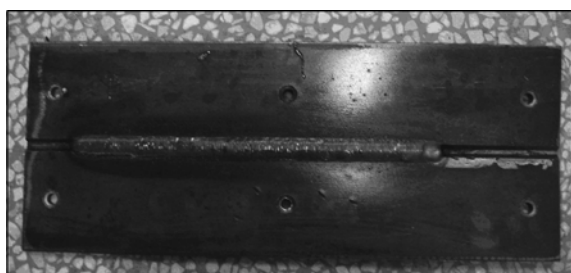


图 7 焊缝跟踪结果

Fig. 7 Result of welding seam tracking

5 结 论

(1) 设计了一种局部干法水下焊接机器人系统. 该系统结构可靠, 运动灵活.

(2) 通过对传感器主要器件进行选型及光路设计, 完成水下激光视觉传感器设计, 实现焊缝自动识别.

(3) 采用机器人底盘与滑块机构协调控制方法, 设计了水下焊接机器人系统控制系统, 试验结果表明, 机器人跟踪过程平稳, 焊接成形质量良好.

参考文献:

- [1] 林柏山. 国内外水下焊接研究概况[M]. 哈尔滨: 哈尔滨焊接研究所, 1986.
- [2] Pandey R K, Swetnam D. Dry hyperbaric MMA welding[J]. *Welding and Metal Fabrication*, 1985, 53(6): 230-238.
- [3] 管泰雄, 蓮井淳. 高压ヘリウム雰囲気におけるアークの特性について[J]. *溶接学会论文集*, 1988, 6(1): 86-91.
- [4] 朱加雷, 焦向东, 周灿丰, 等. 304 不锈钢局部干法自动水下焊接[J]. *焊接学报*, 2009, 30(1): 29-32.
Zhu Jialei, Jiao Xiangdong, Zhou Canfeng, *et al.* Local dry automatic underwater welding of 304 stainless steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(1): 29-32.
- [5] 蒋力培, 王中辉, 焦向东, 等. 水下焊接高压空气环境下 GTAW 电弧特性[J]. *焊接学报*, 2007, 28(6): 1-4.
Jiang Lipei, Wang Zhonghui, Jiao Xiangdong, *et al.* Characteristics of GTAW arc in underwater welding under high-pressure air condition[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(6): 1-4.
- [6] 李志刚, 张 华, 贾剑平, 等. 高压水环境模糊滑模焊缝跟踪[J]. *焊接学报*, 2010, 31(6): 17-20, 24.
Li Zhigang, Zhang Hua, Jia Jianping, *et al.* Weld seam tracking with fuzzy sliding mode controller in high-pressure water environment[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(6): 17-20, 24.

作者简介: 叶艳辉, 男, 1979 年出生, 博士研究生, 讲师. 主要从事机器人和焊接自动化等方面科研工作. 发表论文 10 余篇. Email: yyh-18@163.com