

大型构件水下焊接机器人系统

叶艳辉¹, 张华¹, 潘际銮^{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、焊枪和送丝机等相关设备, 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。

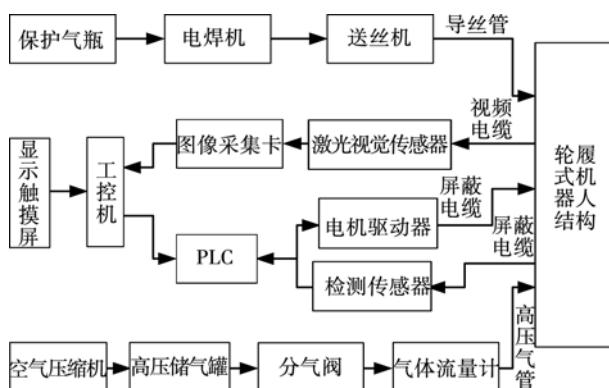


图 1 水下焊接机器人系统

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(2014BAB206007)

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。

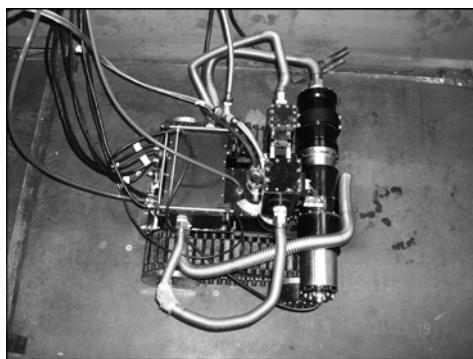


图2 水下焊接机器人物理样机

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($d \times l$) /(mm·mm)	工作温度 $T/\text{°C}$
650	60	<0.5(10 cm处)	$\Phi 14 \times 50$	-20~70

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。

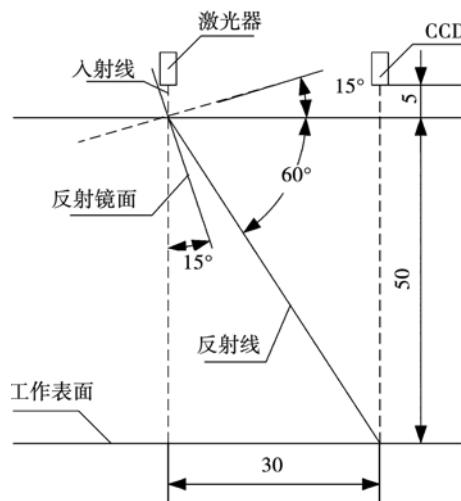


图3 CCD 和激光器的位置关系(mm)

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,激光器下端面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, 经过图像处理后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.

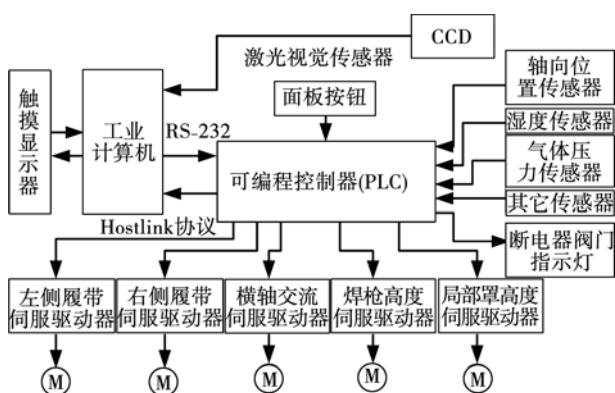


图 4 水下机器人控制系统硬件结构

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.

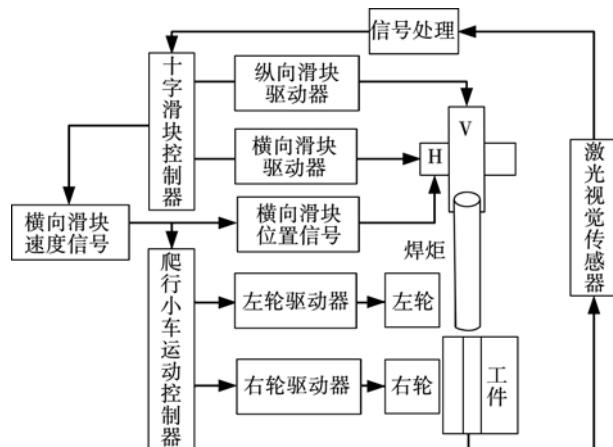


图 5 水下机器人控制方法

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

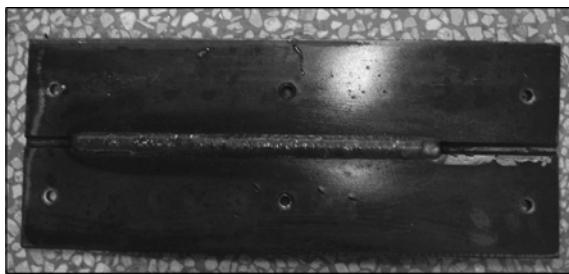


图7 焊缝跟踪结果

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, 莲井淳. 高压ヘリウム雾囲気中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