

基于网络及总线技术的海底管道铺设焊接机器人

焦向东, 罗 雨, 纪文刚, 周灿丰

(北京石油化工学院 能源工程先进连接技术北京市高等学校工程研究中心, 北京 102617)

摘 要: 以开放式控制网络体系结构为理论指导, 研究了海底管道铺设焊接机器人系统中多总线的集成问题. 提出了基于 CAN-open 的数字化焊接电源控制、运动控制、角度传感、电气辅助等功能单元的一体化协同控制策略, 并建立了焊接过程数据库. 针对双行走电机的同步控制问题, 采用同步组“分时通信、同步执行”的协议模型执行同步指令, 提出了变负载运行下双电机驱动的主从速度跟随控制算法. 借助自动化设备规范通信技术, 研究了焊道自动覆盖功能的双机器人协同控制策略. 利用先期焊接实验室及建造场地获得的焊接工艺完成了海上铺管焊接试验. 结果表明, 试验控制机器人系统构成和控制策略合理有效, 焊接效率高, 焊缝成形良好.

关键词: 海底管道铺设; 管道焊接机器人; 开放式控制网络; 主从速度跟随; 协同控制
中图分类号: TG456.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)06-0001-04



焦向东

0 序 言

海底管道铺设生产线由坡口制备、预热、消磁、根焊、填充焊、盖面焊、无损检验和修补、防腐涂覆以及管道输送等工段组成. 优质高效的流水生产线作业是提高深水管道铺设效率和质量的基础^[1]. 焊接作业线每个工作站配备两套双炬铺管焊接机器人系统, 在管道左右两侧对称分布, 并各自完成半个圆周的下行全位置焊接, 铺管焊接机器人稳定高效的焊接是保证铺管效率与质量的关键. 目前国内外管道焊接机器人控制系统大多采用集中控制, 结构封闭、系统可扩充性差, 不利于系统功能扩展; 主控单元采用模拟量或串口通信方式对各功能单元进行控制, 控制线缆多, 信号抗干扰能力差、传输距离短、被控变量少, 实现各功能单元间的协同控制较难, 焊接智能化程度不够, 无法实现精细焊接, 焊接质量不稳定^[2].

文中以开放式的异构控制网络体系结构为理论指导, 研究了铺管焊接机器人系统中各功能单元间多总线的实时互联问题. 并在 CAN 总线时钟同步协议模型下, 分析了执行同步指令的机理, 提出了变负载运行下双电机行走的同步控制算法. 通过自动

化设备规范通信技术, 获得实现焊道自动覆盖功能的技术手段, 进行了铺管焊接机器人海上试验.

1 海管铺设焊接机器人系统

海管铺设焊接机器人系统由焊接机器人机械本体、焊接导轨、主控单元、手控盒、数字化焊接电源以及其它附属设备构成. 焊接工作站在同一焊接导轨上安装两套铺管焊接机器人, 焊接时焊工通过手控盒控制双炬的起弧与停弧位置, 焊接过程实时调整摆心及高低位置, 保证电弧在焊缝内稳定的燃烧, 整个焊接过程可通过单机操作各完成半个圆周的焊接. 也可通过双机器人协同配合完成整个过程的自动焊接.

1.1 海管铺设焊接机器人机械本体

海管铺设焊接机器人机械本体主要由行走机构、锁紧机构、焊枪横向摆动机构、焊枪高低调整机构和焊枪组件等组成, 如图 1 所示. 机器人机械本体通过滑杆-弹簧式锁紧机构连接在导轨上, 闭合锁紧系统后能够使得安装在角接触轴承上的锥形锁紧轮与轨道两侧的圆锥面接触, 行走机构采用凸轮锁紧圆柱齿轮双驱动传动方案, 双驱动齿轮与嵌在轨道上的外圆柱齿圈啮合. 电机和驱动齿轮轴间通过同步带传动, 两个驱动齿轮连同相关的传动轴、驱动电机等相对于机械本体左右方向(即平行于管道轴线方向)对称布置.

横向摆动机构由伺服电机、驱动齿轮轴、齿条、

收稿日期: 2012-01-09

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA09A105);
北京市人才强教计划高层次人才资助项目(PHR20090519);
北京市新世纪百万人才工程资助项目(PHR20090519)

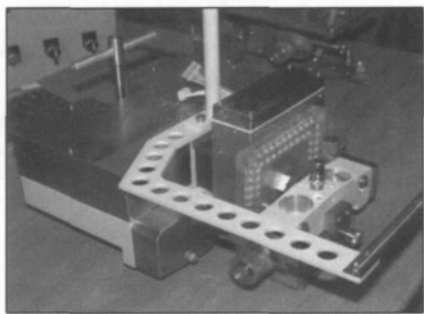


图 1 海底管道铺设焊接机器人

Fig. 1 Offshore pipeline laying welding robot

导杆和支撑体等组成。支撑体固定于车体上,纵向调整及焊枪夹持机构设计为一整体,安装在横向摆动机构前端。齿条通过连接螺栓与纵向调整和焊枪夹持机构组件固连,运行过程中伺服电机带动齿轮轴旋转,在齿轮齿条副作用下,齿条带着焊枪做横向直线运动或直线往复摆动。纵向调整机构采用丝杠螺母副传动方案,由滑块、丝杠、螺母副、伺服电机、同步带等组成。焊枪夹持机构安装在滑块上,滑块与丝杠螺母通过键连接,丝杠的两侧安装固定导杆,并通过直线轴承与滑块配合,以增加纵向调整机构刚度,工作时伺服电机通过同步带驱动丝杠旋转,在丝杠螺母带动下滑块沿导杆做上下运动^[3]。

研制成功的焊接机器人机械本体尺寸小、重量轻(15 kg)、外形美观、结构紧凑、能够在狭小空间内进行焊接,较轻的自重可大幅度降低焊工的工作强度。

1.2 海管铺设焊接机器人控制网络

海管铺设焊接机器人控制网络系统由主控单元、机器人本体驱动单元、焊接电源、手控盒系统以及电气辅助系统组成,主控单元包括基于 windows 软控制的六个功能单元模块、人机组态平台以及数据库系统,如图 2 所示。主控单元控制器选择紧凑型工业平板电脑,集成了实时以太网,作为网络节点可与上层管理系统无缝集成,实现铺管生产线的动态协调及信息化管理^[4]。同时系统可运行控制程序以及组态监控程序,通过 ADS(自动化设备规范)通信接口保证数据的实时交换。海管铺设焊接机器人数据传输采用抗干扰能力较强的 CAN 总线通信,在高速实时以太网耦合单元下挂接 CAN 总线主站模块,焊接机器人运动控制单元各伺服驱动器、倾角传感器以及焊接电源作为 CAN-open 从站站点通过过程数据通信方式,完成 CAN-open 主从站的数据通信;海管铺设焊接机器人控制网络系统结构简单,具备开放性、同步性、可重构性、实时网络性等特点,可

满足管道铺设高效可靠的要求。

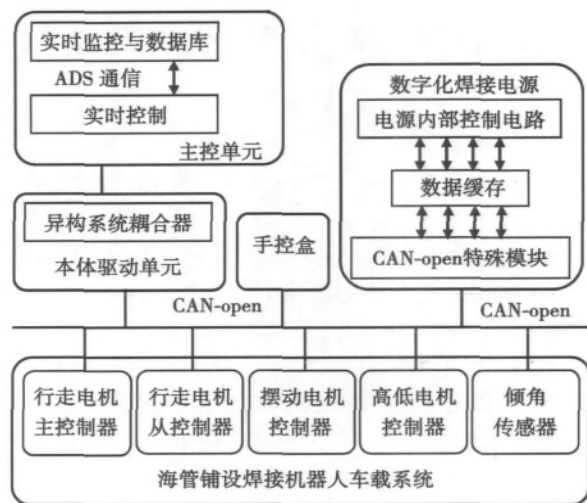


图 2 海底管道铺设焊接机器人控制网络

Fig. 2 Control diagram of offshore pipeline laying welding robot

2 海底管道铺设焊接机器人关键技术

2.1 异构系统控制网络

管道焊接属全位置焊接,不同空间位置需要匹配不同的焊接电参数以及运动参数,焊接过程中还需供电系统监控、保护气流量等电气辅助单元的协同配合。采用运动单元和焊接电源以及电气辅助单元各自独立控制的传统模式带来的弊端是数据交互少、无法实现各功能单元的协同配合,导致系统的综合性能较低。文中系统控制方案采用基于控制网络的管道空间位置与焊接参数相匹配的控制方式,采用开放的异构系统控制网络将运动控制、基于 CAN-open 的数字化焊接电源控制、角度传感、基于 Profibus 总线的电气辅助系统等通过 EtherCAT 高速以太网集成在同一控制系统,多条总线的实时互联可完成不同空间位置焊接工艺参数的给定及多种焊接工艺参数(诸如焊接电流、电弧电压、送丝速度等)的高速采集与处理。也可完成对供电系统、保护气流量、管道加热系统、压缩空气压力的监控,协调配合铺管焊接机器人优质高效的完成整个焊缝对接。

2.2 双行走电动机同步控制技术

对海管铺设焊接机器人行走机构行走速度平稳控制的好坏直接影响到自动焊机的焊接效率以及焊接质量。为提高行走驱动机构的控制性能和平稳性,解决由于刚性轨道连接的行走驱动电机之间存

在的严重耦合关系而导致速度不平稳问题,提出主从速度跟随单轴变负载变增益控制方法,原理如图3所示。

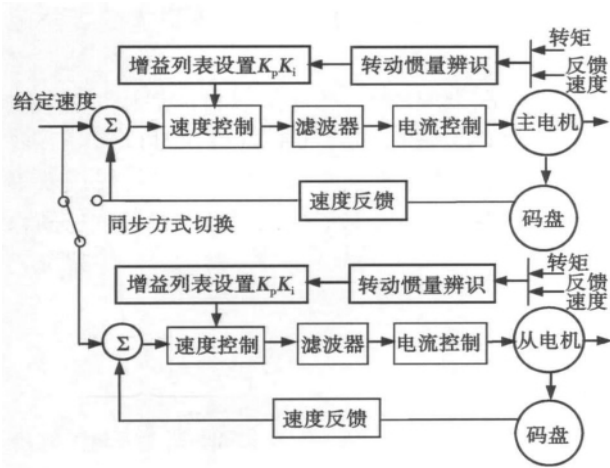


图3 同步控制原理图

Fig. 3 Synchronization control block diagram

启动或停止时仍然采用同步组“分时通信,同步执行”同步指令,同步启动后将同步方式切换为主从速度跟随方式,主电机按照系统的给定位置或速度运行,从电机以主电机的实际输出作为给定值,在运行过程中紧密跟踪主电机,保持和主电机的同步。并采用不同负载匹配不同增益参数的策略可提高速度跟随精度,即单轴控制器把行走机构各电机系统转动惯量作为激活控制器参数的一个函数,建立行走电机变化的系统转动惯量与控制器参数之间的对应关系,通过查表确定该系统转动惯量下的速度控制器参数。图4为使用主从速度跟随算法后的主从轴速度曲线。通过速度曲线可以看到从轴速度能较好的跟踪主轴的速度,并且主从轴都具有较好的运行精度和速度平稳性。

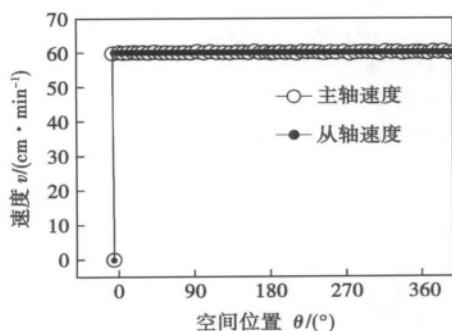


图4 速度跟随算法下的主从轴速度

Fig. 4 Master-slave speed curves of speed follower

2.3 双机器人协同控制实现自动焊道覆盖

为提高焊接效率,铺管焊接现场一个工作站配备两套双炬管道全位置焊接系统,两个双炬焊接机器人沿着导轨各向下完成半个圆周焊接,现有双炬管道全位置焊接系统之间相互独立,当两套焊车同时焊接,会出现撞车危险,而且双炬起弧、停弧位置一致性不好,焊道覆盖时接头处容易形成焊接缺陷。为解决这一问题及减轻焊工工作强度,使用机器人焊接单机控制单元协同接口,通过ADS通信实现两台控制单元的数据交换,左舷焊接单机可读回右舷焊接单机在管道的空间位置、起弧位置、停弧位置以及起弧时的摆心位置和焊枪高低位置,并根据右舷焊接单机的摆心位置调整系统的摆心及焊丝伸出长度。同时辅助使用接触传感功能实现摆心位置的精确定位,然后自动按照双焊接单机的起弧时间差执行自动焊道覆盖工序控制焊接单机完成焊道的无缺陷对接。

3 海底管道自动焊接试验

在渤海湾进行了“深水海底管道铺设技术”海上试验,其中深水海底管道铺设焊接机器人在此次海试中成功承担重任,通过了技术检验。将两套自主研发的铺管焊接机器人系统分左右舷对称配置与铺管船上的焊接工作站内,在行进中的铺管船焊接工作站内进行焊接试验。“BH108”铺管船上的海试焊接工作站现场如图5所示。海上试验采用铺管工程实际使用的试件和焊材,进行打底、填充、盖面焊接。试验用管材为API 5L X65,外径为323.9 mm,壁厚为12.7 mm,填充材料为AWS5.18 ER70S-6,直径为1.0 mm,保护气体为50% CO₂ + 50% Ar,保护气体流量为50 L/min。

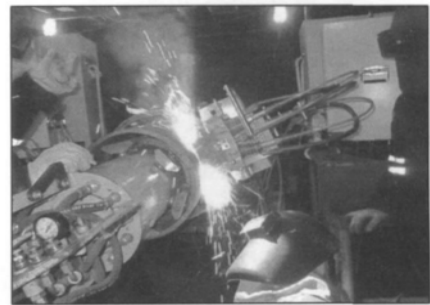


图5 海底管道铺设机器人在海试现场

Fig. 5 Offshore pipe laying welding robot in testing site

根据管材厚度及窄坡口尺寸规划焊接参数,由手控盒选择程序档位,确定焊接层次,输入诸如行车

速度、摆动宽度、摆动频率、驻留时间、送丝速度、电弧电压等焊接分区特征点焊接参数,主控单元可自动插值计算各位置处焊接参数,试车、试气后即可进行焊接。打底焊接时采用背面铜衬垫强制成形技术,保证了打底焊缝的质量,能够提高海底管道铺设效率、降低铺设成本^[5,6]。打底焊背部成形如图 6 所示。利用先期焊接实验室及建造场地获得的焊接工艺,壁厚为 12.7 mm 的管材,在 J 形坡口内施焊需经过打底、填充以及盖面焊接后才能完成管道对接,海试现场焊接完成的合格接头如图 7 所示。

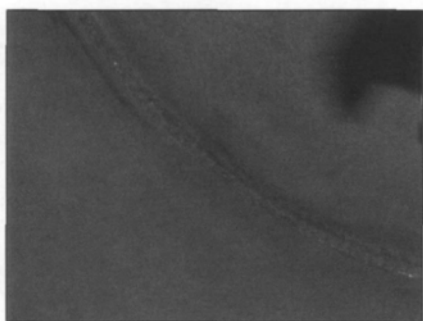


图 6 打底焊背部成形

Fig. 6 Back forming in root weld

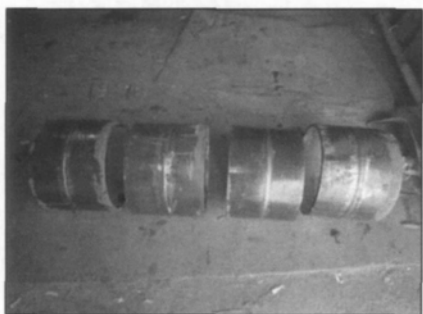


图 7 海底管道对接焊缝

Fig. 7 Pipeline girth welds finished in testing site

4 结 论

(1) 机器人本体尺寸小、结构紧凑、便于操作,能够在狭小空间内进行焊接,较轻的自重可大幅度降低焊工的工作强度,能够满足海管铺设工程的应用需要。

(2) 构建的开放式异构网络控制平台,可实现数字化焊接电源控制、运动控制、角度传感、电气辅助等功能子系统的一体化协同控制。

(3) 采用同步组“分时通信、同步执行”的协议模型执行同步指令控制双电动机运行,提出的主从

速度跟随单轴变增益控制策略,实现了行走电动机的同步控制,保证了机器人快速平稳运行。

(4) 采用焊接机器人协同控制接口,通过 ADS 通信方式,实现了同一焊接工作站双焊接机器人协同操作的自动焊道覆盖功能,完成焊道的无缺陷对接。

(5) 采用熔化极气体保护焊自动焊接工艺,通过双炬、窄间隙坡口和背部铜衬垫内对口器等有效的技术手段,进行了铺管焊接海上试验,焊接效率高,焊缝成形良好,可保证海底管道铺设的优质高效焊接。

参考文献:

- [1] 焦向东,周灿丰,陈家庆,等. 21 世纪海洋工程连接技术的挑战与对策[J]. 焊接,2007,(5): 27-30.
Jiao Xiangdong, Zhou Canfeng, Chen Jiaqing, et al. Challenges and countermeasures of offshore engineering joining technology in 21st century[J]. Welding & Joining, 2007, (5): 27-30.
- [2] 任福深,陈树君,殷树言,等. 管道插接相贯线专用焊接机器人[J]. 焊接学报,2009,30(6): 59-62.
Ren Fushen, Chen Shujun, Yin Shuyan, et al. Special purpose welding robot for intersection welding seam[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(6): 59-62.
- [3] Yong B K, Hyong S M, Jeong C K. Automatic pipeline welding system with self-diagnostic function and laser vision sensor[C]// The Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference. Gyeonggi-do, Korea, 2005: 2-5.
- [4] 石 玟,樊 丁,宋 健. 基于以太网的电焊机网络控制系统[J]. 焊接学报,2005,26(04): 21-24.
Shi Yu, Fan Ding, Song Jian. A network control system of welding machines based on Ethernet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(04): 21-24.
- [5] 曾惠林,杜则裕,黄福祥. 管道环焊缝多焊炬自动内焊机关键技术分析[J]. 焊接学报,2009,30(7): 77-80.
Zhen Huilin, Du Zeyu, Huang Fuxiang. Analysis on key technologies for pipeline internal circumferential automatic welding machine with multi-torch[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(7): 77-80.
- [6] 陈树君,卢振洋,任福深,等. 管道全位置自动焊机的专用电源及焊接工艺[J]. 焊接学报,2009,30(2): 13-16.
Chen Shujun, Lu Zhenyang, Ren Fushen, et al. Special welding machine and welding process for all position automatic pipeline welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 13-16.

作者简介: 焦向东,男,1962 年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为焊接自动化、海洋工程连接技术、水下焊接。发表论文 50 余篇。E-mail: jiaoxiangdong@bupt.edu.cn

MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

Offshore pipeline laying welding robot based on network and field bus techniques

JIAO Xiangdong , LUO Yu , JI Wengang , ZHOU Canfeng (Institution Engineering Research Center of Energy Engineering Advanced Joining Technology , Beijing Institute of Petrochemical Technology , Beijing 102617 , China) . pp 1 - 4

Abstract: The multiple field bus integration in offshore pipeline laying welding robot system was studied under the guidance of open type control network architecture. A new synergic control system architecture that integrates all function units of welding robot such as network communication of digital welding power source , distributed motion control , angle sensor and other auxiliary systems was proposed , and the welding process database used for history record and process management was established as well. To meet the demand of synchronization of dual motor driving the running mechanism , a novel protocol model named " communication by time-sharing and executing on synchronization " is adopted for simultaneous executing velocity command. The master-slave speed follower arithmetic of dual-motor driven welding robot is proposed under the various loads. Through automation device specification communication technology , a cooperative control strategy is used for managing the welding activities of each welding head to obtain proper overlaying welded joint. With the welding procedure developed in the welding laboratory , a series of sound welds have been obtained efficiently in offshore pipeline laying welding site at Bohai Sea. The welding experiments results show the rationality and effectiveness of the robot and its control strategy.

Key words: offshore pipeline laying; pipeline welding robot; open type control network; master-slave speed follower; cooperative control

Analysis of composition and formation of AA-TIG pre-melting oxide layer

FAN Ding^{1,2} , KANG Zaixiang² , HUANG Yong^{1,2} , WANG Xinxin² , QU Huaiyu² , LIU Ruilin² (1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing , The Ministry of Education , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China) . pp 5 - 9

Abstract: The oxide layer is produced on weld position by low current assisting arc with Ar + O₂ as shield gas in AA-TIG welding , the oxygen is introduced as active element to change the fluid flow form in the weld pool so that the weld penetration increases. In this experiment , by monitoring the oxygen flow in shield gas of assisting arc to change the thickness of oxidation layer , the different thickness of oxide layers were analyzed by EPMA and XRD respectively , and then calculated through thermodynamics. The result shows that pre-melting oxide layer mainly contains Cr , Mn , Si and their oxide-based composite oxide. With the role of arc force , the oxides in arc center are driven

to the arc edge region. Finally , the thickness of the oxide layer in the central region is less than that in the edge. The average oxygen content in the oxide layer by XRD analysis is similar to that calculated through thermodynamics.

Key words: stainless steel; AA-TIG welding; oxide layer composition; thermodynamics

Equivalent hot spot stress approach for multiaxial fatigue strength assessment of complex welded joints

LIU Gang , HUANG Ruxu , HUANG Yi (School of Naval Architecture , Dalian University of Technology , Dalian 116024 , China) . pp 10 - 14

Abstract: The current hot spot stress approach still has some limitations to the multiaxial fatigue strength assessment of complex welded joints. In this paper , an new stress estimation approach for the multiaxial fatigue strength assessment of complex welded joints is proposed , in which an equivalent hot spot stress is defined at a point (called Zero Point) in plate thickness direction where nonlinear distribution stress due to the notch effect of the weld is equal to zero. The proposed approach is based on that the nonlinear stress peak is not included in the hot spot stress and the nonlinear distribution stress is in self-equilibrium. First , influence factors and change laws of the Zero Point position were discussed , and a fitting equation for determining the Zero Point position was established. Then , published fatigue tests data and numerical stress results of some welded joints were used for comparison between the proposed equivalent hot spot stress approach and the current hot spot stress approach. The equivalent hot spot stress approach was verified to be consistent with the current hot spot stress approach and also have higher accuracy for considering the thickness effect on the fatigue strength to a certain extent. The merit of the proposed approach is that it can be used to estimate the multiaxial fatigue strength of welded joints through combining multiaxial fatigue theory.

Key words: hot spot stress; multiaxial fatigue; welded joints; structural stress; nonlinear distribution stress

Numerical simulation on as-welded deflection of high speed rail floor based on thermo-mechanical coupling

WANG Ping¹ , FANG Hongyuan¹ , HAN Decheng² , WANG Qiang¹ , LIU Xuesong¹ (1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China; 2. CSR Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co. Ltd. , Qingdao 266111 , China) . pp 15 - 18

Abstract: Based on the thermo-mechanical coupling analysis of FEM , the joining process of high speed rail floor was studied , which was welded by seven pieces of large-scale hollow extruded shape of aluminum alloy. To enhance the calculation precision , the mechanical and thermal-physical properties of the aluminum alloy and its filler metal were tested between room temperature and their melting points , moreover , the moving double-