

双机器人协调焊接任务规划及仿真

张 铁, 欧阳帆

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘 要: 针对复杂曲线焊缝, 对一台机器人夹持待焊接的工件, 另一台机器人对物体进行焊接的双机器人协调焊接运动问题展开研究, 建立了双机器人协调焊接坐标系, 采用非主从式运动学轨迹规划, 给定待焊接物体上某一点 u 的位姿, 通过点 u 到焊接机器人和夹持机器人工具末端的两个约束矩阵, 分别计算得到焊接机器人和夹持机器人的末端轨迹; 焊接过程采用船形焊缝约束, 保证焊枪与焊缝在弧焊过程中始终处于接头成形良好的位置, 建立双机器人协调焊接 Solidworks-SimMechanics 仿真平台, 并对一个管道直角钢制弯头的协调焊接进行了运动学轨迹规划和仿真。结果表明, 建立的平台能精确和有效地对双机器人协调焊接运动进行任务规划和分析, 机器人运动轨迹与规划的轨迹一致。

关键词: 复杂曲线焊缝; 双机器人; 协调焊接

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)12-0009-04



张 铁

0 序 言

在多机器人系统研究中, 多机器人协调 (multi-robot coordination) 问题是研究热点之一。由于多机器人 (以双机器人为代表) 操作物体时形成的闭链系统, 存在受限运动以及冗余度控制问题。因此如何保持多机器人之间运动的协调一致是多机器人协调要解决的问题。对于焊接机器人与变位机之间的协调作业^[1], 以及对于两台焊接机器人同时对一个物体进行焊接的运动协调问题^[2], 已经有了相关的分析和仿真试验。但是对于一台机器人夹持待焊接的工件, 另一台机器人对工件进行焊接的运动协调研究, 目前还比较少。由于变位机一般最多只有 3 个自由度, 灵活性相对于多自由度的机器人要差, 双机器人协调焊接, 夹持工件的机器人的自由度达到 6 个, 可以胜任零件复杂程度和焊接作业灵活度要求更高的焊接任务, 避免了针对特种复杂焊缝设计专用焊接机器人^[3]。针对复杂曲线焊缝的双机器人协调焊接问题, 采用了给定待焊接物体上某一点 u 的位姿, 分别求得两台机器人的运动学位姿的非主从式运动学轨迹规划方法; 最后建立了双机器人协

调焊接 Solidworks-SimMechanics 仿真平台, 并对一个石油和煤矿行业中使用的管道钢制弯头的协调焊接进行了运动学轨迹规划和仿真。

1 双机器人焊接坐标系建立

1.1 坐标系建立

$i=1$ 表示焊接机器人, $i=2$ 表示夹持机器人。 $[R_i]$ 表示机器人基座坐标系, $[E_i]$ 表示机器人末端坐标系, $[u]$ 表示工件坐标系, $[T_i]$ 表示工具坐标系。 ${}^{R_i}T_{E_i}$ 表示机器人末端 $[E_i]$ 到机器人基座 $[R_i]$ 位姿变换矩阵, ${}^{E_i}T_{T_i}$ 表示工具 $[T_i]$ 到机器人末端 $[E_i]$ 位姿变换矩阵, 由工具与机器人末端之间装配关系决定, ${}^{R_1}T_{R_2}$ 表示机器人基座 $[R_2]$ 到机器人基座 $[R_1]$ 的位姿变换矩阵, ${}^{T_i}T_u$ 表示工件上某点 u 到机器人工具末端 $[T_i]$ 的位姿约束矩阵, T_u 表示在机器人基座 $[R_1]$ 坐标系下, 工件上某点 u 以时间为变量的运动学位姿矩阵。双机器人运动学坐标变换关系如图 1 所示。协调焊接的工件和机器人之间的运动学约束关系为

$${}^{R_1}T_{E_1} \cdot {}^{E_1}T_{T_1} \cdot {}^{T_1}T_u = {}^{R_1}T_{R_2} \cdot {}^{R_2}T_{E_2} \cdot {}^{E_2}T_{T_2} \cdot {}^{T_2}T_u = T_u \quad (1)$$

式中: ${}^{R_i}T_{E_i}$ 由机器人 6 个关节的角位移值决定, 为未知; ${}^{E_i}T_{T_i}$ 由工具与机器人末端装配决定; T_u 由机器人操作员根据焊接任务进行设定; ${}^{T_i}T_u$ 根据运动学

收稿日期: 2011-10-08

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (2009AA043901-3); 广东省科技计划项目 (2010B080703004); 粤港关键领域标志 (20090101-4); 广东省省部产学研项目 (2010B090400259); 广东省战略性新兴产业项目 (2011A091101001)

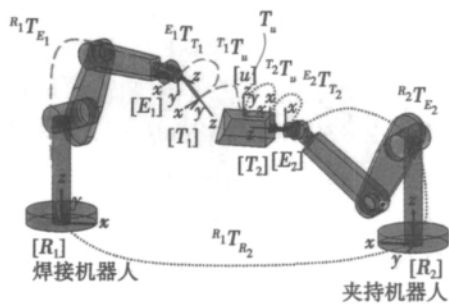


图 1 双机器人协调焊接坐标系

Fig. 1 Two-robot coordinate system

约束关系给定; ${}^{R_1}T_{R_2}$ 变换矩阵, 由两台机器人相对摆放位置决定, 可以通过标定获得^[4], 设这 4 个变换矩阵均为已知。

1.2 机器人逆求解

对于类似于 Puma560 型的 6 自由度机器人, 已知机器人末端笛卡尔空间位姿矩阵 ${}^{R_i}T_{E_i}$, 可以通过解析法求得 6 关节角位移。对于类似 PUMA560 型的 6 自由度工业机器人可能的解析解逆解有 8 组。逆解的选择, 首先要保证所有关节均未超出最大工作范围, 第二, 要避免机器人之间或者机器人与物体间产生碰撞, 第三, 从最小能耗和运动平稳性方面考虑, 要满足整个运动过程中 6 个关节角位移变化量加权乘积之和为最小。

2 运动学轨迹规划和仿真平台建立

考虑到空间焊缝的复杂性以及设定运动轨迹的方便和直观性, 没有采用主从机器人的轨迹规划方法, 而是采用非主从式规划方法^[5], 设定工件上的一点 u 的运动位姿, 通过点 u 到焊接机器人和夹持机器人工具末端的两个约束矩阵, 分别得到焊接机器人和夹持机器人末端轨迹, 再由运动学逆解, 得到每台机器人的 6 个关节的角位移值, 其中 $[{}^{T_1}T_u]^{-1}$, $[{}^{T_2}T_u]^{-1}$ 根据已知运动学约束关系求得, ${}^{R_1}T_{E_1}$, ${}^{R_2}T_{E_2}$ 按照式 (2)、式 (3) 进行求解。

$${}^{R_1}T_{E_1} = T_u \cdot T_1 T_u^{-1} \cdot E_1 T_{T_1}^{-1} \quad (2)$$

$${}^{R_2}T_{E_2} = {}^{R_1}T_{R_2}^{-1} \cdot T_u \cdot T_2 T_u^{-1} \cdot E_2 T_{T_2}^{-1} \quad (3)$$

仿真系统采用 Solidworks-SimMechanics 仿真平台, 所使用的机器人模型为学校实验室的 6 自由度机器人, 机器人连杆参数见表 1。

建模过程包括: 第一步, 在 Solidworks 中进行 3D 建模; 第二步, 在 Mathworks 公司官方网站下载 SimMechanics Link 插件, 通过 Matlab 执行安装命令, 将插件安装到 Solidworks 软件中; 第三步, 将在

表 1 机器人连杆参数
Table 1 Parameters of robot

连杆转角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	连杆长度 a_{i-1}/mm	连杆偏距 d_i/mm	初始关节角 $\theta_i/(^{\circ})$	转角范围 $\theta/(^{\circ})$	最大速度 $v/(^{\circ}) \cdot \text{s}^{-1}$
0	0	0	0	± 180	90
-90	250	0	0	$-150 \sim +70$	90
0	875	0	0	$-165 \sim +80$	90
-90	31	1 100	0	± 350	110
90	0	0	0	± 130	110
-90	0	0	0	± 355	200

Solidworks 中建立的 3D 模型, 另存为 xml 文件; 第四步, 在 Matlab 中, 导入 xml 文件, 将自动生成 SimMechanics 模型; 最后, 在 SimMechanics 模型上添加相关 S 函数、关节驱动器、传感器和示波器等模块, 实现对 SimMechanics 模型进行驱动和仿真。所建立的仿真系统工作原理如图 2 所示。

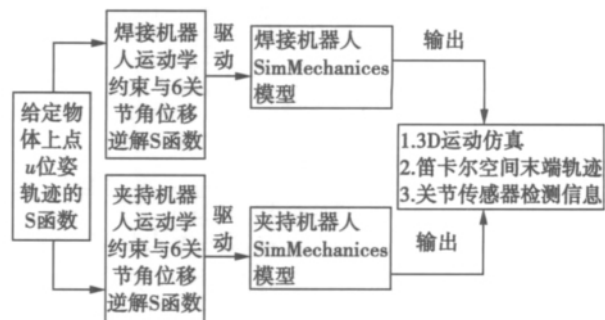


图 2 Solidworks-SimMechanics 仿真模型结构

Fig. 2 Structure of Solidworks-SimMechanics platform

3 钢制弯头协调焊接运动轨迹规划

对于空间复杂曲线焊缝, 要实现焊缝的连续焊接, 必须不断的将待焊点顺序移到各自的理想位置。在这个过程中, 双机器人要实现协调焊接运动, 焊枪与焊缝之间不仅有位姿约束, 而且存在相对运动约束。位姿约束要求焊枪相对焊缝保持一定姿态的前提下不能脱离焊缝; 运动约束要求焊枪和焊缝之间满足一定的相对运动, 从而实现焊缝的焊接。对此, 采用船形焊缝约束^[1], 在焊接过程中的每一时刻, 焊缝法线方向均与重力方向相反, 保证焊枪与焊缝在弧焊过程中始终处于接头成形良好的位置。

仿真选择一个在煤矿和石油化工行业广泛使用的直角钢制弯头作为双机器人协调焊接的零件, 钢制弯头由 4 段钢管焊接而成, 如图 3a 所示, 尺寸如图 3b、c 所示。由于焊缝为椭圆形, 一次焊接会造成

夹持机器人第 4 关节超出工作范围,因此将焊接工作平分成两段半圆弧进行,焊接完第一段圆弧以后,夹持机器人回复到焊接起始位置,再进行第二段半圆弧的焊接,焊接任务设计见图 4。

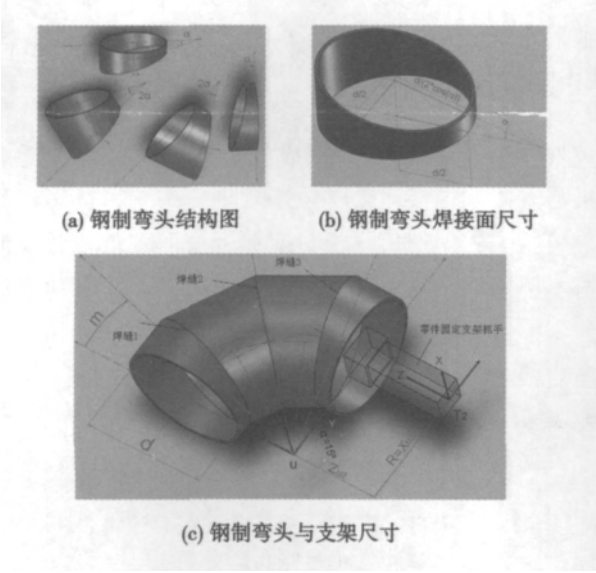


图 3 钢制弯头与支架尺寸

Fig. 3 Structure and dimensions of steel curved pipe

参数 m 表示坐标系 $[u]$ 的 z 轴与其在焊缝截面上的投影之间的夹角(图 3c),弯头中心线半径 $R = 200 \text{ mm}$,弯头两端圆的直径 $d = 200 \text{ mm}$,焊缝截面的倾斜角 $\alpha = 15^\circ$, $x_{u2} = 0$, $y_{u2} = 200 \text{ mm}$, $z_{u2} = -150 \text{ mm}$,如图 3b, c 所示。由此可以得到下面的矩

$$[T_1 T_u]_{\text{顺时针}}^{-1} = T_m \begin{pmatrix} R_{z(0)} R_y(-\pi t/T) R_x(\pi) & \sin(\pi t/T) d/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$[T_1 T_u]_{\text{逆时针}}^{-1} = T_m \begin{pmatrix} R_{z(0)} R_y(\pi t/T) R_x(\pi) & -\sin(\pi t/T) d/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$[T_2 T_u]^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{u2} \\ 0 & 1 & 0 & y_{u2} \\ 0 & 0 & 1 & z_{u2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

4 钢制弯头协调焊接运动仿真

在图 3c 中,焊缝截面的倾斜角 α 为 15° ,3 条焊缝的夹角 m 分别等于 15° , 45° 和 75° ,以焊缝 2 为例,进行双机器人协调焊接的运动仿真,焊缝 2 的

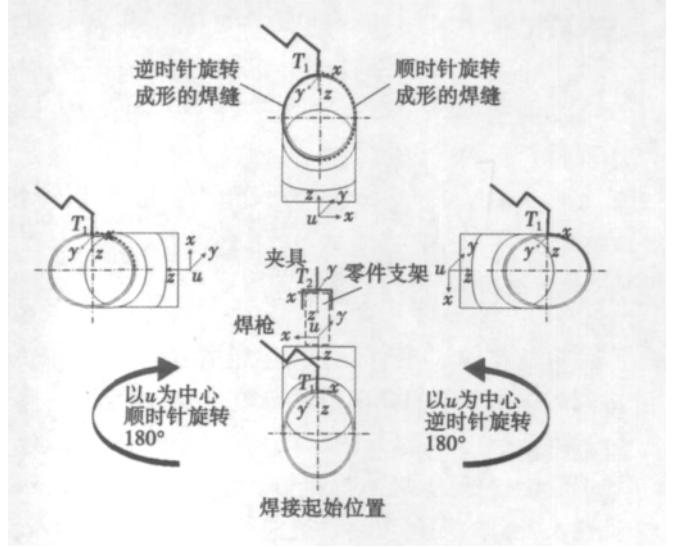


图 4 两段半圆弧焊接任务设计

Fig. 4 Coordinated welding task design

阵 3×3 旋转矩阵采用固定角坐标系 $R_{z(a)} R_{y(\beta)} R_{x(\gamma)}$ 旋转方式, μ 设定为直角钢制弯头的零件在 yz 平面上的圆心。仿真运行时间设为常数 T ,时间变量为 $t \in [0, T]$, T_m 为焊接机器人焊枪相对于坐标系 $[u]$ 转过夹角 m 的旋转角度补偿矩阵,作用是将焊枪焊接的工作平面调整到与焊缝所在平面重合。

$$T_m = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos(-m\pi/180) & -\sin(-m\pi/180) & 0 & 0 \\ \sin(-m\pi/180) & \cos(-m\pi/180) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \sin(\pi t/T) d/2 \\ 0 \\ R/\cos\alpha - \cos(\pi t/T) d/(2\cos\alpha) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} -\sin(\pi t/T) d/2 \\ 0 \\ R/\cos\alpha - \cos(\pi t/T) d/(2\cos\alpha) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$m = 45^\circ$, 仿真时间 t 设定为 20 s 。已知

$$E_1 T_{T_1} = \begin{pmatrix} 0.707 & 1 & 0 & -0.707 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.707 & 1 & 0 & 0.707 & 1 & 303 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$E_2 T_{T_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 210 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

设定点 u 位姿随时间变化的矩阵 T_u 为

$$T_{u\text{顺时针}} = \begin{pmatrix} -\cos(\pi t/T) & 0.7071 \sin(\pi t/T) & 0.7071 \sin(\pi t/T) & 1700 \\ 0 & 0.7071 & -0.7071 & -400 \\ -\sin(\pi t/T) & -0.7071 \cos(\pi t/T) & -0.7071 \cos(\pi t/T) & 600 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$T_{u\text{逆时针}} = \begin{pmatrix} -\cos(\pi t/T) & -0.7071 \sin(\pi t/T) & -0.7071 \sin(\pi t/T) & 1700 \\ 0 & 0.7071 & -0.7071 & -400 \\ \sin(\pi t/T) & -0.7071 \cos(\pi t/T) & -0.7071 \cos(\pi t/T) & 600 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

得到式(4)~式(11)以后,在图2中的运动学协调焊接模型中的S函数进行矩阵参数的设定,然后就可运行模型,进行仿真。从仿真动画来看,焊枪和焊缝能很好的贴合,焊接过程平稳,如图5;从双机器人各自的工具末端轨迹曲线来看,两台机器人工具末端轨迹均为一条在 xz 轴平面的半圆弧/半椭圆弧,轨迹平滑无抖动和突变;从机器人6关节角位移曲线(图6)中,看出所有关节角位移均在工作范围内,曲线平滑无突变。

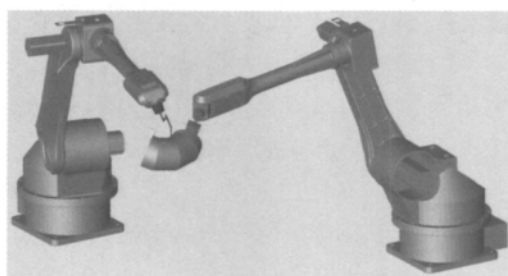


图5 逆时针转动椭圆弧焊接运动仿真

Fig. 5 Two-robot coordinated welding simulation

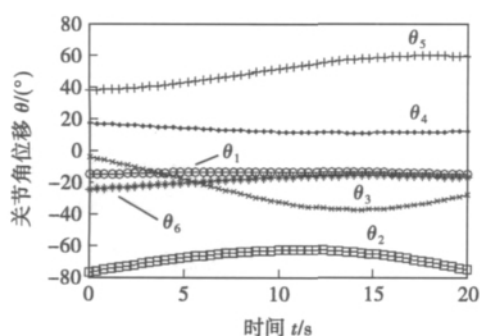


图6 逆时针旋转焊接机器人6关节角位移

Fig. 6 Six joint displacement curves of welding robot (clockwise rotation)

规划方法,能够很好地完成复杂空间曲线焊缝的双机器人协调焊接运动学轨迹规划。

(2) 建立的仿真平台能够方便有效地进行双机器人协调焊接作业的任务设计、运动学分析和离线编程。

参考文献:

- [1] 康艳军,朱灯林,陈俊伟. 弧焊机器人和变位机协调运动的研究[J]. 电焊机, 2005(3): 46-49.
Kang Yanjun, Zhu Denglin, Chen Junwei. Study on coordinative motion of arc-robot and positioner[J]. Electric Welding Machine, 2005(3): 46-49.
- [2] 张华军,张广军,蔡春波,等. 双面双弧焊机器人主从协调运动控制[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 25-28.
Zhang Huajun, Zhang Guangjun, Cai Chunbo, et al. Master-slave coordinated motion controlling of double-sided arc welding robots [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 25-28.
- [3] 任福深,陈树君,管新勇,等. 管道插接相贯线专用焊接机器人[J]. 焊接学报, 2009, 30(6): 61-64.
Ren Fushen, Chen Shujun, Guan Xinyong, et al. Special-purpose welding robot for intersection welding seam [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(6): 61-64.
- [4] 张文增,陈强,孙振国,等. 弧焊机器人工件坐标系快速标定方法[J]. 焊接学报, 2005, 26(7): 1-4.
Zhang Wenzeng, Chen Qiang, Sun Zhenguo, et al. Quick calibration method of part coordinates for arc welding robot [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(7): 1-4.
- [5] Uchiyama M, Dauchez P. A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots [C]// Robotics and Automation, 1988. Proceedings, 1988 IEEE International Conference, 1988: 350-356.

作者简介: 张铁,男,1968年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要从事机器人技术及应用领域的研究和开发工作。发表论文90余篇。Email: merobot@scut.edu.cn

4 结 论

(1) 提出的非主从式双机器人协调焊接的轨迹

MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

Nonlinear gradient features of grain size in TIG welded joint for titanium alloy

ZHANG Jianxun¹, DONG Lina¹, ZHANG Linjie¹, WANG Yiqing² (1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China) . pp 1 - 4

Abstract: In the paper, based on the grain size observation and statistics analysis on TIG welded joints of TC4 titanium alloy, the gradient features of the grain sizes in welded joints with different heat input are studied experimentally for characterizing the microstructure heterogeneity by introducing a conception of grain gradient eigenvalue. The results show that the grain size in the TIG welded joint nonlinearly changes from the center of weld metal after the heat affected zone to the base metal, and the size changing rate (grain gradient) has a maximum value in the boundary between the columnar zone (CZ) and coarse grain zone (CGZ) . The grain size gradient maximum value proposed as the grain gradient eigenvalue is inversely proportional to heat input in TIG welding and its position is independent with the heat input. The concept of the grain gradient eigenvalue can represent the microstructure heterogeneity in the welded zone and heat affected zone, and is significantly important for evaluating the service properties of titanium alloy welded joint.

Key words: titanium alloy; TIG welding; grain size

Interfacial structure and strength of Si₃N₄ ceramics joint brazed with amorphous filler metal and Cu layer

ZOU Jiasheng, ZUO Huaiwen, XU Xiangping (Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China) . pp 5 - 8

Abstract: Si₃N₄ ceramics were brazed with TiZrCuB amorphous filler metal and Cu interlayer, the effect of brazing metal compositions and thickness of copper foil on interfacial structure and bonding strength were studied in this paper. The result shows that the joint strength is up to 241 MPa when the brazing temperature is 1 323 K, holding time is 30 min, the thickness of Cu interlayer is 70 μm and the exerted pressure is 0.027 MPa. The reaction layer is TiN and the interface microstructure is compound of Si₃N₄/TiN/Ti-Si + Ti-Zr + Cu-Zr + α-Cu. Changing the thickness of interlayer can adjust the thickness and compositions of the reaction layer. As the thickness of Cu interlayer increased, Ti-Si compound layer was gradually separated from the TiN layer, and was pushed into the weld center and refined to a granular shape.

Key words: amorphous brazing filler metals; Cu interlayer; Si₃N₄ ceramics; interface structure; bending strength

Task planning and simulation of two-robot welding coordination

ZHANG Tie, OUYANG Fan (School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China) . pp 9 - 12

Abstract: This paper focuses on the dual-robot welding coordination of complex curve seams that one robot grasps the workpiece while the other holds the torch, then the two robots work on the same workpiece coordinately. The dual-robot coordination system is established at the beginning, after that, the non master/slave scheme is chosen for the kinematics trajectory planning. The non master/slave scheme sets the position and poses of the point on the workpiece, and calculates the end effector trajectories of both robots through the constrained matrixes respectively. Downhand welding is employed in the kinematics trajectory planning that can guarantee the torch and the weld in good contact condition all the time during the welding process. Moreover, a Solidworks-SimMechanics platform is established for motion simulation, and an example of curved steel pipe welding is conducted. The results indicate that the established platform is accurate and effective for the task planning and analysis welding coordination of two robots. The output trajectories of both the joint displacements and end effectors are the same as predefined ones.

Key words: complex curve seam; two robot; coordination of welding

Study on influence factors of temperature in localized ultra-high frequency induction brazing

SU Honghua, LI Qilin, XU Jiuhua, FU Yucan (College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China) . pp 13 - 17

Abstract: The technology of localized ultra-high frequency induction brazing is introduced. The effect of influence factors, such as material of ferrite core, gap and coil structure, on temperature in induction brazing are investigated and analyzed. An optimal combination of technological parameters is obtained through experiments. At last, localized ultra-high frequency induction brazing of diamond is carried out based on the above parameters. The result demonstrates that the width of melted area of filler alloy is less than 3 mm. The diamond is wetted by the filler alloy. The interfacial structure between diamond and filler alloy is investigated by scanning electron microscope (SEM) and energy dispersion spectrometer (EDS) . The result shows that the bond between diamond and filler alloy is established through a cross-diffusion of carbon and chromium.

Key words: diamond; localized heating; ultra-high frequency; induction brazing

Microstructure and corrosion resistance of welding joints of economic ferritic stainless steel

ZHANG Yong¹, QIN Zuoxiang¹, XU Hongji¹, LU Xing¹, TONG Wei² (1. Liaoning Key Materials Laboratory for Railway, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. School of Transport and Communication Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China) . pp 18 - 22