

修焊机器人非线性关节系统建模与控制算法

刘佳君¹, 孙振国¹, 张文增¹, 陈强^{1,2}

(1. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 浙江清华长三角研究院, 嘉兴 314006)

摘要: 针对所研制修焊机器人关节存在死区、间隙等高度非线性环节, 影响系统动态响应性能与作业路径精度的问题, 采用粒子群优化的方法辨识了含间隙非线性环节的机器人主动关节模型, 结合辨识结果采用间隙补偿切换控制算法, 并综合采用基于速度逆运动学的前馈反馈复合控制, 提高了主动关节的角度跟踪控制精度。控制算法的实际试验结果显示, 机器人各主动关节联动控制下的机器人末端作业单元直线路径的平均误差 0.2 mm。结果表明, 所采用软件算法有效弥补了低精密度减速器的不足, 降低硬件成本。

关键词: 修焊机器人; 非线性系统; 辨识; 间隙补偿; 前馈

中图分类号: TP 242 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2014)08-0048-05

0 序 言

为提高大型水轮机叶片等复杂曲面大型结构件修焊作业的自动化水平, 研制了一种两端永磁间隙吸附式修焊机器人样机^[1]。该修焊机器人由移动平台、机械臂和末端作业单元三部分组成。相比于以往研发的移动焊接机器人^[2,3], 为解决机器人可靠吸附、灵活运动以及复杂曲面的适应性问题, 其末端作业单元与移动平台均配置永磁吸附装置的双端吸附设计形成了封闭结构, 有效克服了串联开链式机械臂刚度不足的缺点; 主动关节和被动关节相结合的欠驱动机械臂机构设计, 保证了对复杂曲面的良好适应性。

一般机器人关节系统中普遍存在的死区、间隙等非线性环节, 具有显著的迟滞作用, 严重情况下还会导致系统出现极限环震荡甚至失稳^[4]。目前标准工业机器人大多半闭环关节转角控制, 即只反馈电机输出, 依靠基本消除了间隙的高成本精密减速器(如行星齿轮式等)来保证低速端的线性比例, 使得机器人末端路径运动重复精度达到了 0.02~0.05 mm 的水平。

综合考虑成本、体积及掉电自锁等多种因素, 所研制的专用机器人采用成本较低、间隙稍大的蜗轮蜗杆传动。初步测试表明, 若不采取任何补偿措施, 蜗轮蜗杆等非线性环节可能引起 0.3°以上的关节角度误差, 末端作业单元产生 2.5~3.5 mm 的路径误

差, 无法满足修焊工艺要求修焊机器人末端作业路径误差小于 1 mm 精度要求。

基于上述背景, 重点研究存在死区和间隙等非线性环节的机器人关节系统的数学建模和控制算法, 并在研制的修焊机器人样机上进行试验验证, 尝试为同类的采用低精密度减速器多关节机器人系统, 探索通过控制算法软件设计替代高成本精密减速器硬件, 改善末端路径运动精度的可行性。

1 非线性关节系统建模与参数辨识

针对死区与间隙存在的系统进行的控制绝大多数会根据特定的非线性模型参数对这两类非线性环节进行补偿^[5,6]以抵消其不利影响, 这就需要对系统建立模型并具有较准确的认识。

1.1 非线性关节系统建模

典型的机器人非线性关节系统模型如图 1 所示。输入电压 u'_e 经过死区环节后, 作为控制电压信号 u_e 进入电机控制系统当中。P 为减速比, 综合了电动机自带减速器与蜗轮蜗杆减速箱两部分的减速比。输出转角 θ 经过蜗轮蜗杆输出端的间隙非线性环节后形成最终的关节实际转角 θ_r 。其中线性环

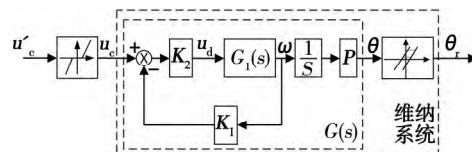


图 1 机器人关节开环模型框图

Fig. 1 Open loop model block diagram of joint

收稿日期: 2014-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875147); 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划 2007AA04Z258)

节 $G(s)$ 及与其串联的非线性间隙环节构成典型的维纳(Wiener)系统。输入端的死区环节可以在输入信号中根据离线标定建立的逆死区模型加入补偿量来予以抵消,下面重点考虑带间隙的 Wiener 系统的建模。

以驱动电压 u_d 为输入,电机轴转速 ω 为输出的电机模型 $G_1(s)$ 可以看作一阶惯性系统。以控制电压 u_e 为输入,角度 θ 为输出,可得图 1 所示系统的线性部分的传递函数 $G(s)$,即

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U_e(s)} = \frac{b}{s^2 + as} \quad (1)$$

式中: a 、 b 为模型参数。

以切换函数为基础,构造参数化如图 2 所示的间隙非线性环节模型^[7],其数学模型为

$$\begin{aligned} \theta_r(k) = & m_L [\theta(k) + c_L] f_1(k) + m_R [\theta(k) - c_R] f_2(k) \\ & + \theta_r(k-1) [1 - f_1(k)] [1 - f_2(k)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: m_L 、 m_R 、 c_L 、 c_R 为间隙参数; $f_1(k) = h([m_L \theta(k) + m_L c_L - \theta_r(k-1)]/m_L)$; $f_2(k) = h([m_R \theta(k) - m_R c_R]/m_R)$; $h(s)$ 为切换函数,即

$$h(s) = \begin{cases} 0, & s > 0 \\ 1, & s \leq 0 \end{cases}.$$

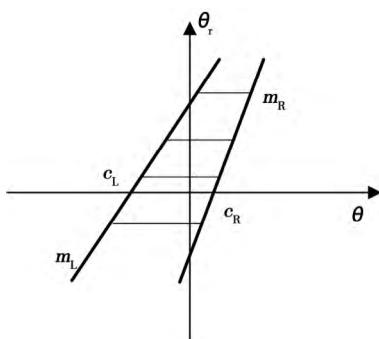


图 2 间隙特性

Fig. 2 Backlash characteristic

1.2 采用粒子群优化方法的 Wiener 系统参数辨识

所谓参数辨识就是确定式(1)、式(2)中的 a 、 b 、 c_L 、 c_R 等未知参数的过程。一种做法是用待定系数法通过试验测得间隙非线性环节的 c_L 、 c_R ,通过在电机自带减速器的输出端加减角度传感器,采用扫频法测定线性环节 $G(s)$ 中的 a 和 b 。

为避免将系统拆解并添加额外传感器的繁琐过程,最新的研究将此类由线性环节与非线性环节构成的典型 Wiener 系统,看成一个整体黑箱系统,利用输入电压 u_e 和输出角度 θ_r 的相关数据,将对相关未知参数的辨识过程转化为对式(3)所示的目标函数极小化求解问题,即

$$J(x) = \sum_{k=1}^n [e(k|x)]^2 \quad (3)$$

式中: $e(k|x) = \theta_r(k) - \hat{\theta}_r(k|x)$; $x = (a\ b\ c_L\ c_R)^T$ 为参数向量; $\theta_r(k)$ 为测量值; $\hat{\theta}_r(k|x)$ 为利用所估计的参数向量 x 结合输入量 根据式(2) 右侧所得的 $\theta_r(k)$ 的估计值。

现有的基于迭代或递推算法的对含间隙非线性环节的 Wiener 系统的辨识方法^[7-8]均采用最小二乘法思想,要求通过简化方法使得变量与常量参数完全解耦且目标函数可导,但是存在间隙非线性环节的目标函数与理想情况相差过大,在某些情况可能出现无法收敛的情况。

为避免上述缺点,尝试采用粒子群优化方法进行系统辨识^[9]。粒子群优化算法无需计算目标函数梯度,若目标函数待定参数为 D 个,那么算法将该问题转化为 D 维超空间的搜索问题,首先随机初始化若干作为可能解的“粒子”,第 i 个粒子的坐标 x_i 为

$$x_i = (x_{i1}\ x_{i2}\ \dots\ x_{iD}) \quad (4)$$

每个粒子在各个时刻 k 具有一定的速度 v_{id}^k 与位置 x_{id}^k ,二者按照式(5)、式(6)进行更新,即

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (5)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (6)$$

式中: p_{id}^k 为该粒子个体运动过程中的最佳位置; p_{gd}^k 为全部粒子运动过程中的最佳位置。最佳位置以目标函数 $J(x_{id})$ 取值极小作为标准选取。而 c_1 为“认知系数”表示单个粒子运动轨迹受本身运动历史的影响程度; c_2 为“社会系数”,表示单个粒子的运动轨迹受该粒子与其它粒子间共享信息的影响程度; r_1 与 r_2 为分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数。

采用粒子群优化方法对 3 个主动关节的 Wiener 系统的相关参数进行整体辨识,均获得了收敛的结果,详见表 1。其中由于增益可以在线性与非线性系统之间交换,故不失一般性将 m_L 归一化为 1。

表 1 关节参数整体辨识结果

Table 1 Results of joints parameters identification

关节	模型参数 1	模型参数 2	间隙参数 1	间隙参数 2	间隙参数 3
	a	b	m_R	c_L	c_R
2	27.47	102.07	0.98	1.40	0.54
3	17.74	101.62	1.04	1.49	0.20
6	36.38	3 999.20	0.99	0.25	0.14

1.3 单关节系统的闭环稳定性分析

图 3 所示为基本的关节角度跟踪闭环系统,以目标关节角度 θ_t 作为输入量,以实际输出量 θ_r 作为闭环反馈量,增益为 K 。由于死区环节已经通过离线

标定采用逆死区进行了补偿,所以仍将开环系统视作线性环节 $C(s)$ 与间隙非线性环节串联的 Wiener 系统,并通过描述函数法判断该系统的稳定性。这里以第3关节为代表进行分析。

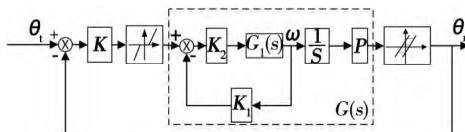


图3 机器人关节闭环模型框图

Fig. 3 Close loop model block diagram of joint

第3关节反馈系数 K 取典型控制条件下的 0.4, 图4中 R_e , I_m 分别为实数、虚数坐标轴。 $H(s)$ 表示结合已经辨识出的开环线性环节模型 $G(s)$ 求取的闭环后的线性环节传递函数的 Nyquist 曲线, $-1/N$ 是根据所辨识的间隙环节的参数绘制的描述函数负倒数特性曲线。由于 Nyquist 曲线不包围负倒数特性曲线, 所以系统稳定; 另外因二者不相交, 故不存在极限环震荡。第 2~6 关节的稳定性分析结果类似, 不再赘述。

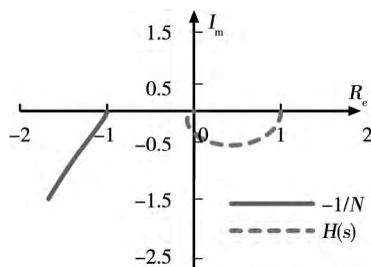


图4 闭环系统的描述函数法稳定性分析

Fig. 4 Stability analysis by describing-function method

2 单关节系统的间隙补偿切换控制

虽然以 θ_r 作为反馈信号构成的闭环控制系统可在间隙出现时作出响应, 能够有效控制关节角度跟踪的平均误差, 但是间隙环节造成的迟滞仍然会导致较大的瞬时误差。以第3关节为例, 实际试验的结果如图5所示, 间隙出现时, 单纯依靠固定参数闭环控制的关节系统将出现 0.8° 左右的瞬时误差。故提出一种如图6所示的基于传动模型的间隙补偿方法。该方法综合传动系统输入、输出轴传感量判断是否出现间隙并确定补偿量, 不要求传动间隙固定且无需历史时刻的运动方向先验知识。

通过传动机构输出端的绝对编码器传感量、电机轴自身的增量编码器传感量以及减速比 P , 可以

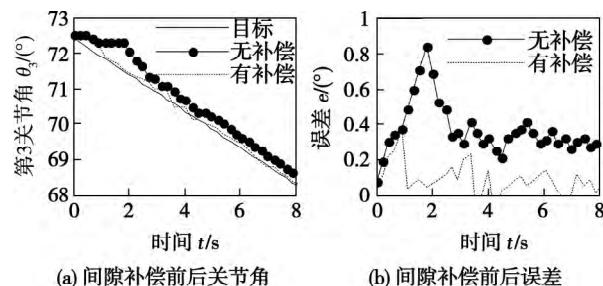


图5 间隙补偿切换控制试验结果

Fig. 5 Experimental result of backlash compensation

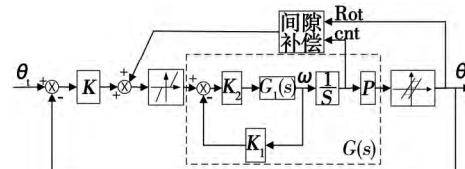


图6 加入间隙补偿环节的控制系统框图

Fig. 6 Block diagram with backlash compensation

判断运行中的关节状态是否处于间隙环节的“记忆区”, “记忆区”是图2中两条斜线的中间区域, 在此区域内输入量的变化无法引起输出量改变。关节状态处于记忆区中时, 驱动器将由反馈控制切换至补偿控制, 即令电机继续以高速向同向运行 c_L 或者 c_R (按运行方向确定), 其后再检测其是否仍在间隙记忆区内, 若判断关节系统在记忆区外则切换回正常控制, 否则继续进行补偿控制。如图6所示, 加入该间隙补偿切换控制后有效地将关节间隙造成的跟踪误差峰值由 0.8° 以上降低至 0.4° 以下。

3 单关节系统的前馈反馈复合控制

仅对间隙进行补偿的控制方法下, 关节对目标角度序列的跟踪平均误差仍然较大。图7为第3关节实际角度跟踪试验中所截取的一段数据, 其中的“反馈”项为仅采用间隙补偿方法的闭环控制, 其平

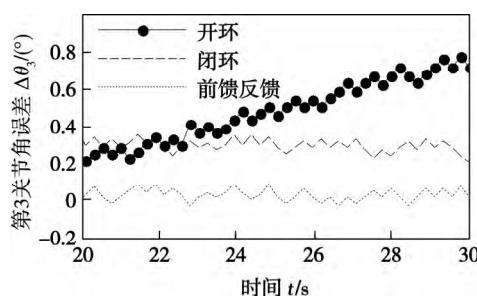


图7 第3关节角度跟踪控制误差对比试验结果

Fig. 7 Errors of joint3 trajectory tracking control

均误差仍为 0.3° 左右.

进一步采用前馈反馈复合控制方法(图8),借助前馈控制的优点进一步降低非线性环节的迟滞影响,提高作业路径动态精度.虽然在单关节层面无法确定前馈量,但通过所建立的DH坐标系(图9)结合机器人逆运动学计算,已知末端作业单元运行路径位置与速度时,可建立机器人末端作业单元速度向量 X 与各关节角速度组成的向量 q 的关系,如式(7),从而对前馈量进行确定.

$$X = Jq \quad (7)$$

式中: $X = [X_6, Y_6, Z_6, \omega_{x6}, \omega_{y6}, \omega_{z6}]^T$; $q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$; J 为雅克比矩阵,其计算方法参照文献[10].

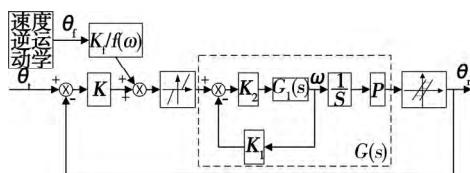


图8 前馈反馈复合控制系统框图

Fig. 8 Feedforward-feedback control system

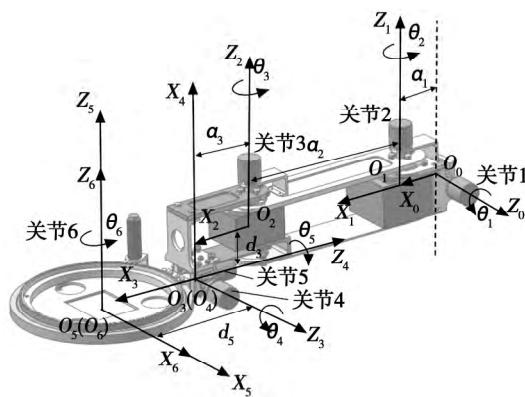


图9 机器人DH坐标系

Fig. 9 DH coordinate system of manipulator

一般情况下,前馈系数 K_f 可根据控制电路进行理论计算所得的关系式 $v_e = K_f\omega$.这里采取了对稳态下电机转速 ω 与DSP控制电压 u 的转换关系 $u = f(\omega)$ 进行离线标定的方法,可以在对死区非线性环节实现较大程度补偿的基础上实现更准确的前馈输入量.

如图7中的“前馈反馈”数据曲线所示,前馈反馈复合控制下,关节角度跟踪平均误差由原来的约 0.3° 降低至约 0.03° .

增大反馈系数同样可以起到降低跟踪平均误差的效果,同时也可以一定程度上降低间隙引起的瞬时误差.但如图10所示,实际试验中对第3关节采

用前馈反馈复合控制,平均误差为 0.03° 时,驱动电机转速波动峰值仅为 134.8 rad/s .而在单纯的闭环控制下,通过增大反馈系数使得平均误差下降至 0.05° 时,所引起的驱动电机转速波动峰值扩大到 997.0 rad/s .可见前馈反馈复合控制有效抑制了由于非线性环节迟滞因素引起的电机转速波动.

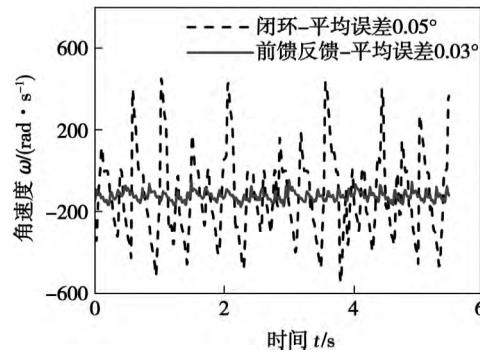


图10 第3关节角度跟踪控制波动对比试验结果

Fig. 10 Comparison of rotation speed fluctuation

4 试验验证

在修焊作业机器人多关节串联系统上进行了末端路径运动控制精度的试验验证.在修焊作业的目标路径 L (多数以直线段为主)确定的情况下,将其离散化为若干路径点构成的序列 $\{P_i\}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$),进而根据图8的DH坐标系及逆运动学,由每个路径点的笛卡儿坐标及速度方向计算生成各主动关节的角度序列 $\{\theta_{ki}\}$ 及角速度序列 $\{\dot{\theta}_{ki}\}$.那么控制各主动关节按照所生成的序列精确联动即可保证末端作业单元完成目标路径.

试验综合采用了间隙补偿切换控制与前馈反馈复合控制,以提高末端作业单元沿直线路径运动的精度.试验在平面吸附条件下进行.试验结果如图11所示.纵轴表示的路径误差为实际测量的路径点与对应的目标路径点的距离.

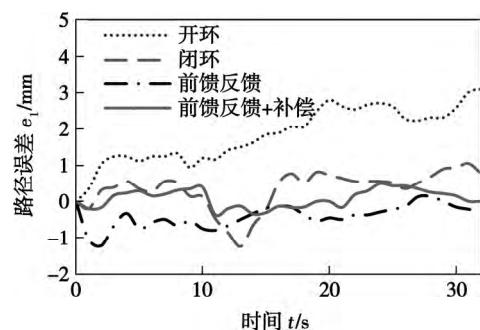


图11 末端作业单元路径控制误差试验结果

Fig. 11 Comparison of end effector route control error

上述试验结果表明,综合采用前馈反馈复合控制以及间隙补偿切换控制下的各主动关节联动所实现的末端作业单元路径精度更为理想,平均误差为0.2 mm,最大误差0.5 mm。

5 结 论

(1) 对存在间隙非线性环节的机器人主动关节系统参数的整体辨识,粒子群优化可避免传统方法不收敛的问题,且辨识结果便于判断闭环系统的稳定性。

(2) 基于传动模型的间隙补偿切换控制算法及前馈反馈复合控制算法,能在保证关节驱动电机转速波动较小的条件下,显著提高修焊机器人主动关节控制精度。实现了用软件算法来弥补低精密度减速器的不足,降低了机械硬件成本。

(3) 在水平吸附条件下,对机器人各主动关节进行联动控制,得到了端作业单元直线路径平均误差0.2 mm,最大误差0.5 mm的结果,说明所研究方法有效可行。

参考文献:

- [1] 马献德,陈强,孙振国,等.具有自主定位功能的水轮机叶片坑内修焊机器人[J].*焊接学报*,2012,33(8):21~24.
Ma Xiande, Chen Qiang, Sun Zhenguo, et al. On-site turbine blade repairing robot with self-positioning function [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(8): 21~24.
- [2] 焦向东,蒋力培,薛龙,等.球罐全位置焊接机器人智能

控制系统[J].*焊接学报*,2000,21(4):1~4.

Jiao Xiangdong, Jiang Lipei, Xue Long, et al. Intelligent control system of all-position welding robot [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(4): 1~4.

- [3] 毛志伟,张华,郑国云.旋转电弧传感弯曲焊缝移动焊接机器人结构设计[J].*焊接学报*,2006,26(11):51~54.
Mao Zhiwei, Zhang Hua, Zheng Guoyun. Structure design of mobile welding robot based on rotating arc sensor for bending weld [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 26 (11): 51~54.
- [4] Hägglund T. Automatic on-line estimation of backlash in control loops[J]. *Journal of Process Control*, 2007, 17(6): 489~499.
- [5] Tao G, Kokotović P V. Discrete-time adaptive control of systems with unknown deadzones [J]. *International Journal of Control*. 1995, 61(1): 1~17.
- [6] Tao G, Kokotovic P V. Continuous-time adaptive control of systems with unknown backlash [J]. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 1995, 40(6): 1083~1087.
- [7] Vörös J. Modeling and identification of systems with backlash [J]. *Automatica*, 2010, 46(2): 369~374.
- [8] Dong R, Tan Y. On-line identification algorithm and convergence analysis for sandwich systems with backlash [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2011, 9(3): 588~594.
- [9] Kennedy J. Particle swarm optimization [M]. Springer: Encyclopedia of Machine Learning, 2010.
- [10] Jazar R N. Theory of applied robotics [M]. New York: Springer Science + Business Media, 2010.

作者简介: 刘佳君,男,1987年出生,博士研究生,主要从事机器人技术及应用方面的研究工作。发表论文3篇。liujj05@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 孙振国,男,副教授。Email: sunzhg@tsinghua.edu.cn

method data, the turning point of S-N curve requires turning transition. In order to make the S-N curve and the breaking point N_0 have more engineering application value, the theory and method of transition point connected with variable slope curve was proposed. The feasibility of using variable slope method has been verified by experiment, and the two curves were compared by analysis. The results show that the new method of drawing the S-N curve can display the performance of welding joints spot more accurately.

Key words: spot welded joints; S-N curve; breaking point N_0 ; variable slope slash transition

Analysis of vibration fatigue S-N curve on Q235B steel butt welded joint FAN Wenxue^{1,2}, CHEN Furong¹, XIE Ruijun¹, TANG Dafu¹ (1. Institute of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Mining Institute, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China). pp 39–42

Abstract: The interrelation of static fatigue S-N curve and vibration fatigue S-N curve on Q235B steel butt welded joints has been analyzed. The result shows they have the same slope, and vibration fatigue S-N curve is a continuous curve without horizontal section. It moves a specified distance in stress axis. At the same time, the vibration fatigue S-N curve expression was input. In this paper, the static fatigue test and tensile test under different load frequency were done. And vibration fatigue correction factor was 0.345 2. Through correction of residual stress and size, the fatigue limit was 114.84 MPa when the cycles were 5×10^6 under vibration fatigue S-N curve. And it only has a little bias 7.60%, it shows that the method of this paper can be used to infer vibration fatigue S-N curve of Q235B steel.

Key words: Q235B steel welded joint; vibration fatigue; S-N curve

Formation process of hot cracking in copper He shielding gas tungsten welding LI Yinan¹, YAN Jiuchun², GUO Feng¹, PENG Zilong¹ (1. Department of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). pp 43–47

Abstract: The formation mechanism of hot cracking in gas tungsten arc welding (GTAW) of copper structures in large dimensions was researched. The dynamic formation process of hot cracking was observed and analyzed. The formation criterion of hot cracking was optimized based on the Prokhorov's theory, and the finite element model of thick copper plates in GTAW welding was established based on the rigid restraint cracking test. It is concluded that the internal deformation rate $\Delta\varepsilon$ is the internal reason of forming hot cracking. The variation of the transverse tensile stress and the $\Delta\varepsilon$ in brittle temperature range (BTR) was obtained. And the formation mechanism of hot cracking without preheating was carried out compared $\Delta\varepsilon$ with high temperature ductility of HS201 welded metal. The variation of $\Delta\varepsilon$ in differ-

ence preheating temperature was analyzed to prevent hot cracking forming, and it can be concluded that the $\Delta\varepsilon$ in BTR could be declined by preheating process and the cracking susceptibility will be decreased.

Key words: copper; hot cracking; gas tungsten arc welding

Modeling and control of the nonlinear joints system of mobile repair welding robot LIU Jiajun¹, SUN Zhenguo¹, ZHANG Wenzeng¹, CHEN Qiang^{1,2} (1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Ministry of Education, Beijing 100084, China; 2. Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China). pp 48–52

Abstract: Highly nonlinear units such as deadzone and backlash exist in the joints of mobile repair welding robot, which have negative effects on control accuracy. To improve the path control accuracy of the end effector, Particle swarm optimization algorithm is used to identify the model of the nonlinear joints system. Then switching compensation control method referring the identified model is applied to the joint controlling system, combined with feedforward-feedback control based on inverse kinematics, the hybrid control method realize considerable path accuracy. Experiments show that the average path error of designed welding robot's end effector is less than 0.2 mm with this control method, and the shortcomings of low precision reducer are compensated.

Key words: mobile welding robot; nonlinear system; identification; backlash compensation; feedforward

Feature characters extraction with visual attention method based on three-light-path weld pool images ZHANG Yan, LÜ Na, HUANG Yiming, CHEN Shanben (Intelligentized Robotic Welding Technology Laboratory, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). pp 53–56

Abstract: Seam tracking and weld penetration control are key parts of weld quality control. A three-light-path vision sensing system is used in the experiments to obtain the images of the top-front, top-back and back paths of the weld pool during the Al alloy GTAW welding and project them in the same picture at the same time. The image contains information of the seam, weld pool and back weld pool. The method of visual attention is adopted to find the small areas related to weld pool feature characters, and extract these characters from the image. The results show that, in real-time detection of the weld pool features during the welding process, the method of visual attention is more clarified and efficient than general methods as it focuses only on interested small areas.

Key words: welding quality control; weld pool image processing; visual attention; region of interest detection

Investigation on three-dimensional real coupling numerical simulation of temperature field of friction stir welding of 2219 aluminum alloy DU Yanfeng^{1,2}, BAI Jingbin¹, TIAN Zhijie¹, LI Jinsong¹, ZHANG Yanhua² (1. Capital Aerospace