

遥控焊接力觉临场感仿人智能控制

刘立君，吴林

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 通过对遥控焊接过程力觉误差目标轨迹分析, 在力觉临场感 PID 控制模型基础上, 提出了遥控焊接力觉临场感仿人智能控制策略, 实现了遥控焊接力觉仿人智能控制特征模型、特征辨识、特征记忆、多模态控制和多目标决策。试验表明, 和常规 PID 控制器比较, 采用仿人智能控制, 更能使焊接操作者具有良好“手感”, 增加对遥控焊接复杂任务操作能力, 提高遥控焊接质量。

关键词: 遥控焊接; 力觉临场感; 仿人智能控制; 焊接干扰

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)07-09-04

刘立君



0 序 言

遥控焊接力觉临场感就是将远地从机器人感知到的机器人和焊接环境的力交互信息, 实时地、真实地反馈给主端操作者, 使操作者产生身临其境的动力学感觉, 从而与其它形成的临场感遥控焊接机器人系统一起有效地感知焊接环境及控制从手机器人完成焊接任务。采用力反馈-位置型双向力反应控制结构, 当操作者在主机器人上施加一定的作用力, 主机器人则产生运动, 计算机将主机器人的运动信息传送给从机器人, 使其产生相同的运动, 在主机器人和从机器人上安装了腕力传感器。当从机器人末端与环境接触时, 腕力传感器将向计算机传送其接触力, 计算机按 PD(比例、积分和微分)控制方式根据主机器人和从机器人的力差来驱动从机器人各关节力矩电机, 进而向操作者施加一个大小相等(有差控制)方向相反的作用力。使操作者虽远离现场, 但有如身临其境的力感觉^[1~6]。

仿人智能控制, 模拟人的控制经验与技巧, 依据被控量偏差的变化(变化量大小, 变化趋势等), 及时调整控制量的大小, 来抑制偏差的变化。依据先前调整的经验, 结合当前偏差的变化(或系统状态的变化), 事先做出预调, 预调量的大小及方向来自于以往的经验。不需要对被控对象或过程进行建模^[7~11], 用仿人智能控制代替 PID 控制, 比较适合焊接过程控制, 将焊工丰富经验融入机器人从手遥控焊接控制中, 对提高遥控焊接稳定性, 扩大遥控焊接机器人作业能力具有一定现实意义。

收稿日期: 2004-08-24

基金项目: 国家“十五”预研项目(413185.1.2)

1 遥控焊接力觉临场感系统

遥控焊接力觉临场系统如图 1 所示。在机器人手臂末端对称安装力传感器, 当主机器人末端施加一个很小的力, 此力尚不足以克服传动装置和电机的摩擦力和惯性力而直接使之运动, 只有主动端力传感器感觉到这个力, 并输出一个力信号。而从动端的力信号仍为零, 于是产生一个力误差, 计算机按仿人智能控制方式由 PWM(Pulse Width Modulation)驱动主机器人上光电码盘, 经过与尚未动作的从机器人光电码盘加以比较, 就会产生一个位置误差信号, 它通过位置仿人智能控制器运算后, 与从机器人通讯, 实施修正从机器人位置误差的方向动作, 从而形成了跟随主机器人的运动。反之, 如果在从机器人末端施加一个力(负载), 则会使两个力矩传感器的输出不平衡, 产生的力误差信号加到主机器人力矩电机上, 使操作者在主机器人上感觉到这个加在机器人末端的作用力。

无论是主机器人部分还是从机器人部分在力传感器靠近电机一侧的所有环节中的任何一侧的力都能全部反映到主机器人端上。这正是作者所希望的, 即在主机器人或从机器人所加的有效运动和作用力(操作力或负载力)都能在另一端如实地反映出来, 而在主从式机器人系统中的摩擦力和惯性的影响却被大部分消除了。

2 遥控焊接力觉临场感仿人智能控制

焊接过程具有非线性、时变性和不确定性, 焊接电弧表现为高度的非线性、高噪声干扰、动态突变

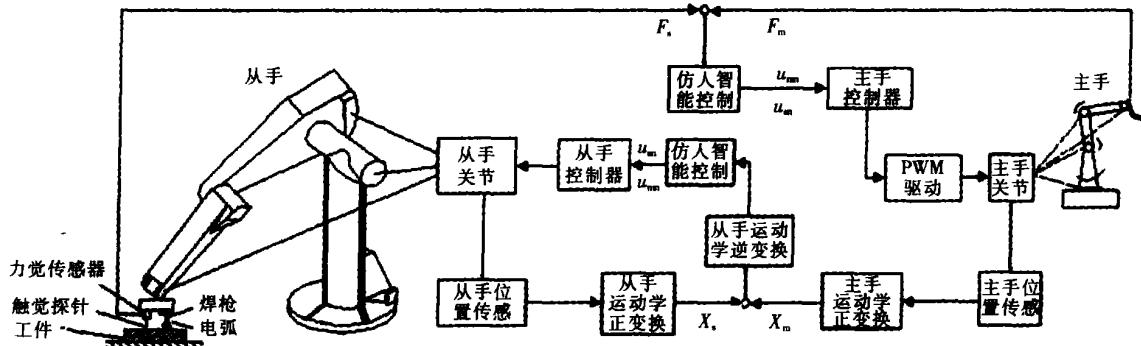


图 1 遥控焊接力觉临场控制系统结构框图

Fig. 1 Structure diagram of force telepresence control system in remote welding

性,这些复杂性都难以用精确的数学模型来描述。特别是焊接过程中干扰使焊接电弧一些特性不断变化,变化规律常常是未知的、不确知的和不确定的。现有 PID 等控制理论依靠数学解析的方法,对焊接电弧及其所处焊接环境中存在的未知的、不确知的和不确定的信息无法及时处理。对于复杂而未知的控制对象(如焊接电弧),熟练操作该对象的手动控制是一般控制方法所无法比拟的,仿人智能控制就是在对人的控制结构宏观模拟的基础上进一步研究人的控制行为功能并加以模拟。仿人智能控制器单元结构如图 2。

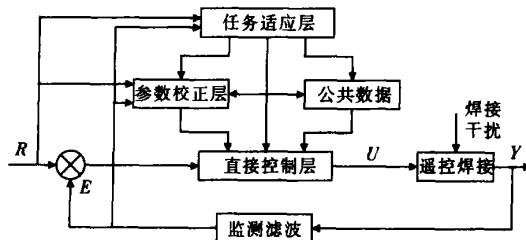


图 2 仿人智能控制器单元结构图

Fig. 2 Human simulation intelligent controller (HSIC) structure diagram

仿人智能控制是从分级递阶智能控制系统的最低层(运动控制级)着手,充分利用已有的控制理论和计算机仿真结果直接对人的控制经验、技巧和各种直觉推理逻辑进行测辨、概括和总结,编制各种简单实用、精度高、能实时运行的控制算法,并把它们直接应用于实际控制系统。

对于遥控焊接力觉系统,希望从机器人的运动与主机器人完全一致,从机器人所感觉到的接触力与主机器人的力完全相等,但由于一些不确定因素的影响,二者之间存在一定的误差,这时可根据操作者经验,通过仿人智能在线调整遥控焊接过程主机器人人力觉和从机器人位置,从而最终实现主从遥控

焊接力觉的一致性。

2.1 遥控焊接力觉临场感仿人智能控制特征变量

遥控焊接力觉临场感仿人智能控制的特征变量是描述遥控焊接过程动态特征,遥控焊接中力觉和从机器人位置控制都属二阶系统,通过典型二阶系统阶跃响应曲线(图 3)来说明遥控焊接力觉临场感仿人智能控制的特征变量表现形式,特征变量的符号变化见表 1。

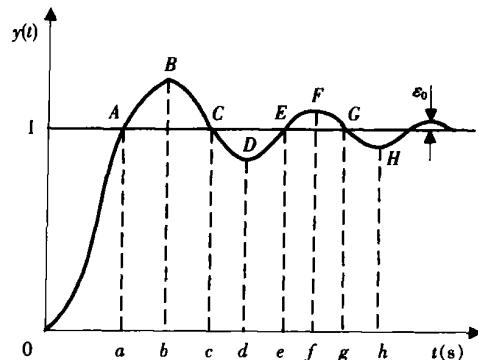


图 3 典型二阶系统阶跃响应曲线

Fig. 3 Step response curve of typical second order system

设 e_n 为当前采样时刻误差值, e_{n-1} 、 e_{n-2} 分别表示前一个和前两个采样时刻误差值,则有

$$\Delta e_n = e_n - e_{n-1}, \quad \Delta e_{n-1} = e_{n-1} - e_{n-2}.$$

$e_n \cdot \Delta e_n < 0$ 时,如 BC 段和 DE 段,表示系统的动态过程正向着误差减小的方向变化,即误差的绝

表 1 特征变量的符号变化

Table 1 Symbol change of characteristic variable

项目	OA 段	AB 段	BC 段	CD 段	DE 段
e_n	> 0	< 0	< 0	> 0	> 0
Δe_n	< 0	< 0	> 0	> 0	> 0
$e_n \cdot \Delta e_n$	< 0	> 0	< 0	> 0	< 0

对值逐渐减小。 $e_n \cdot \Delta e_n > 0$ 时, 如 AB 段和 CD 段, 表示系统的动态过程正向着误差变大的方向变化, 即误差的绝对值逐渐增大。

若 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} < 0$ 表征出现极值, 若 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} > 0$ 表征无极值。 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1}$ 和 $e_n \cdot \Delta e_n$ 联合使用, 可以判断动态过程出现误差极值后的变化趋势。 $|\Delta e_n / e_n|$ 描述了系统动态过程中误差变化的姿态。与 $e_n \cdot \Delta e_n$ 联合使用, 可捕捉动态过程不同姿态, 能对 BC 、 DE 段中间部分进行描述。 $|\Delta e_n / \Delta e_{n-1}|$ 反映了误差的局部变化趋势, 也间接表示前期控制效果。如该值大, 表示前期控制效果不显著。 $\Delta(\Delta e_n)$ 为误差变化的变化率, 即二次差分, 它是描述动态过程的一个特征量, 如图 3 中, ABC 段, $\Delta(\Delta e_n) > 0$ 处于超调段。 CDE 段, $\Delta(\Delta e_n) < 0$ 处于回调段。

2.2 遥控焊接力觉仿人智能控制

在遥控焊接时, 逆变电源和焊接电弧存在高频干扰, 高频干扰等扰动信号影响力觉数据信号的可靠性, 影响焊接操作者力觉临场感效果。文中对力觉信号的动态过程进行仿人智能控制, 通过对力觉动态过程变化趋势监测, 采取不同控制算法, 提高遥控焊接力觉临场感效果。遥控焊接力觉理想误差目标轨迹如图 4 所示。

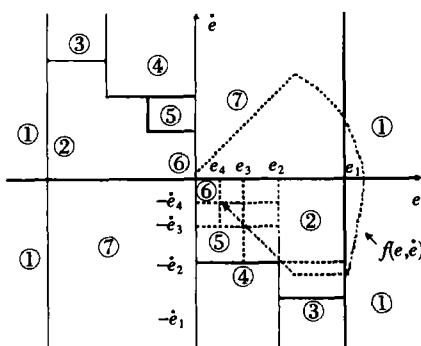


图 4 遥控焊接力觉仿人智能控制误差目标轨迹

Fig 4 Error target track of force HSC in remote welding

图中虚线所示轨迹为理想误差目标轨迹 $f(e)$, e_1 , e_2 , e_3 , e_4 为力偏差的阈值, 即将图 3 中 BC 段对力划分 4 部分, $-e_1$, $-e_2$, $-e_3$, $-e_4$ 为力偏差变化率阈值, 即将图 3 中 BC 段对力偏差变化率划分 4 部分, 上述 8 个参数是根据具体遥控焊接力觉系统实际效果来确定, 当采集的力觉信号的误差和误差变化率进入图 4 不同区域, 应采取不同控制方法, 为使实际轨迹尽可能地与理想误差目标轨迹一致。采取措施分析如下:

(1) 在力偏差较大时, 对应区域①, 采取尽可能大的控制作用, 采用 BANG-BANG 模态控制。

(2) 在力偏差和力偏差变化率均很小, 满足要求时, 对应区域⑥, 采取保持模态控制。

(3) 在力偏差减小过程中, 若力偏差变化速度低于或等于预定速度时, 对应区域②, 采取比例模态控制。若力偏差变化速度大于预定速度时, 对应区域③和⑤, 采用比例加微分的控制模式。若引入微分模态仍不能使力偏差变化速度减小到预定速度范围, 对应区域④, 通过改变 S_p 符号, 引入正反馈抑制力偏差变化速度。

(4) 在力偏差增大过程中, 对应区域⑦, 对应图 3 中 AB 段, 为了抑制力偏差的增大, 使力偏差尽快回头, 采用比例、积分和微分的控制模式。以上分析同样适合 CD 和 DE 段的分析。

根据以上分析, 遥控焊接特征基元集合 Q_1

$$Q_1 = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9\}, \quad (1)$$

其中: $q_1: e_n \cdot \Delta e_n \leq 0$, $q_2: e_n \geq e_1$, $q_3: e_n \geq e_2$, $q_4: e_n \leq e_2$, $q_5: e_n \geq e_3$, $q_6: e_n \geq e_4$, $q_7: e_n \leq e_4$, $q_8: e_n \geq e_1$, $q_9: e_n \geq e_2$

控制级的模型 Φ_1

$$\Phi_1 = \{\Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_{13}, \Phi_{14}, \Phi_{15}, \Phi_{16}, \Phi_{17}\}, \quad (2)$$

其中: $\Phi_{11} \Rightarrow [q_1]$,

$$\Phi_{12} \Rightarrow [q_1 \cap q_2 \cap (q_5 \cap \tilde{q}_9 \cup q_6 \cap \tilde{q}_8 \cup q_4 \cap q_8 \cap \tilde{q}_7 \cup q_3 \cap \tilde{q}_7 \cap \tilde{q}_6)],$$

$$\Phi_{13} \Rightarrow [q_1 \cap \tilde{q}_2 \cap q_3 \cap q_6],$$

$$\Phi_{14} \Rightarrow [q_1 \cap \tilde{q}_3 \cap \tilde{q}_7],$$

$$\Phi_{15} \Rightarrow [q_1 \cap q_8 \cap q_7 \cap \tilde{q}_4],$$

$$\Phi_{16} \Rightarrow [\tilde{q}_8 \cap \tilde{q}_9],$$

$$\Phi_{17} \Rightarrow [\tilde{q}_1 \cap \tilde{q}_2].$$

控制模态集 ψ

$$\psi = \{\psi_{11}, \psi_{12}, \psi_{13}, \psi_{14}, \psi_{15}\}, \quad (3)$$

其中: $\psi_{11} \Rightarrow u_{mn} = K_p \cdot e_n + K_d \cdot e_n + K_i \int e_n dt$

$$\psi_{12} \Rightarrow u_{mn} = \text{sgn}(e_n) \cdot U_{\max},$$

$$\psi_{13} \Rightarrow u_{mn} = S_p \cdot K_p \cdot e_n + K_d \cdot e_n,$$

$$\psi_{14} \Rightarrow u_{mn} = K_p \cdot e_n,$$

$$\psi_{15} \Rightarrow u_{mn} = u_{m(n-1)}.$$

推理规则集 Ω_1

$$\Omega_1 = \{\Omega_{11}, \Omega_{12}, \Omega_{13}, \Omega_{14}, \Omega_{15}\}, \quad (4)$$

其中: $\Omega_{11} \Phi_{17} \Rightarrow \psi_{11}$,

$$\Omega_{12} \Phi_{11} \Rightarrow \psi_{12},$$

$$\Omega_{13} \Phi_{13} \cap \Phi_{14} \cap \Phi_{15} \Rightarrow \psi_{13},$$

$$\Omega_{14} \Phi_{12} \Rightarrow \psi_{14},$$

$$\Omega_{15} \Phi_{16} \Rightarrow \psi_{15}.$$

式中: u_{mn} 为主手控制器的第 n 次输出; $u_{m(n-1)}$ 为主手控制器的第 $n-1$ 次输出; e_n 为第 n 次力偏差值, $e_n = F_{mn} - F_{sn}$; F_{mn} 为主手第 n 次输出力; F_{sn} 为从手第 n 次输出力; K_p 为比例系数; S_p 为 K_p 的符号; U_{max} 为控制器输出最大值; e_n 为第 n 次力偏差的变化率; K_d 为微分系数; K_i 为积分系数;

文中提出的仿人智能控制策略实质上是一种在控制过程中自动变参数变结构控制器, 它根据控制误差的大小与变化方向, 采用前向推理方法, 逐步判别控制规则集中各条规则的条件, 若满足则控制器执行该规则的控制算法, 否则继续搜索。在控制决策的过程中, 由于采用了控制误差作为推理的条件, 具有实时性强、实现简单的特点。

3 遥控焊接力觉仿人智能控制试验及结果分析

图 5a 为力觉 PD 控制, 主臂能部分地跟踪从臂和环境的接触力, 因此该控制方式能够产生初步力觉临场感的效果。图 5b 为力觉仿人智能控制, 主臂能较好地跟踪从臂和环境的接触力, 故该控制方法适合于遥控焊接力觉临场感系统的设计, 可实现较好的力觉临场感效果。同时从图 5 中可以看出, 主臂力跟踪曲线尚存在一定的误差和迟滞性, 其原因为主从臂质量和刚度的影响, 接触力作用的瞬间, 非

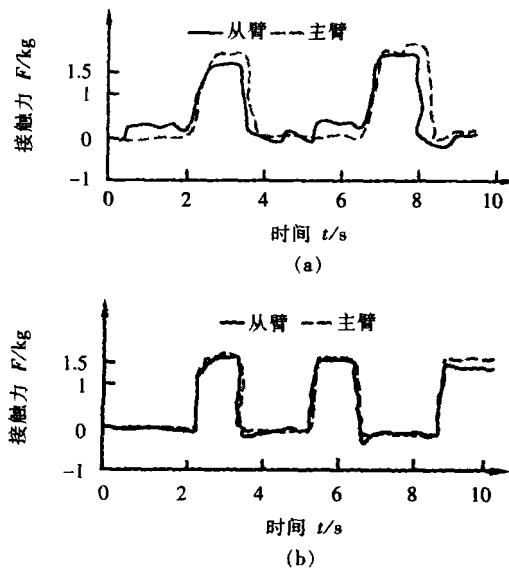


图 5 遥控焊接力觉仿人智能控制保真度测试曲线

Fig 5 Fidelity testing curves of force HSC in remote welding

线性碰撞动力学的影响, 无参数校正级控制, 传感器误差的影响和部分摩擦力没有消除掉。

4 结 论

建立仿人智能控制遥控焊接力觉临场感系统相应算法, 实现了遥控焊接力觉仿人智能控制特征模型、特征辨识、特征记忆、多模态控制和多目标决策。通过对遥控焊接环境下力觉 PID 控制和仿人智能控制试验比较分析, 仿人智能控制具有良好力觉保真度, 使焊接操作者具有较好的力觉临场感效果, 从而提高遥控焊接遥示教效率和精度。

参考文献:

- [1] 宁祎, 林功顺. 空间遥控主-从式智能机器人 STANFORD 型主机械手设计研究 [J]. 郑州工业高等专科学校学报, 1995, 11(2): 1-5.
- [2] 韩莉莉, 宁祎, 白灵. STANFORD 型手控器的力觉临场感系统研究 [J]. 郑州轻工业学院学报, 1998, 13(2): 17-20.
- [3] 殷跃红, 朱剑英. 智能机器力觉及力控制研究综述 [J]. 航空学报, 1999, 20(1): 1-7.
- [4] 周龙江, 宋爱国, 曾庆军, 等. 遥操作机器人手控器的研究进展 [J]. 机器人技术与应用, 2002, 20(4): 11-15.
- [5] 陈卫东, 蔡鹤皋, 席裕庚, 等. 具有力觉临场感主从机器人在遥装配作业中的应用 [J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(12): 57-68.
- [6] Wu Wei, Liu Danjun, You Bo, et al. Auto tracing of welding robot with force sensor [J]. Transaction of the China Welding Institution, 1995, 16(3): 158-161.
吴威, 刘丹军, 尤波, 等. 触觉式机器人焊缝跟踪方法 [J], 焊接学报, 1995, 16(3): 158-161.
- [7] 程远楚, 傅闯, 叶鲁卿, 等. 水轮机调速器的仿人智能 PID 控制 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 56-59.
- [8] Matsuhira N, Arai K, Bambu H. Maneuverability of a master slave manipulator with different configurations and its evaluation tests [J]. Advanced Robotics, 1994, 8(2): 185-203.
- [9] Kammermeier R, Buss M. Multi model sensory feedback based on a mathematical model of human perception [A]. Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems [C]. Kyongju, Korea: IEEE Industrial Electronics Society, 1999: 1537-1542.
- [10] 徐亚庆, 李祖枢. 一种新型的仿人智能控制器的设计方法 [J]. 自动化学报, 1994, 20(5): 616-621.
- [11] 苏宇峰, 李祖枢. 一种新的参数在线自校正仿人智能控制算法 [J]. 工业控制计算机, 2003, 16(11): 29-31.

作者简介: 刘立君, 男, 1968 年出生, 博士生, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究遥控弧焊机器人焊接过程智能控制。

Email: 888liujun@163.com

MAIN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Quick calibration method of part coordinates for arc welding robot

ZHANG Wen zeng CHEN Qiang SUN Zhen guo TANG Xiaohua
(Department of Mechanical Engineering Tsinghua University Beijing 100084 China). p1 - 4

Abstract The part coordinates are always calibrated before the arc welding robot carries out some tasks. Traditional methods use expensive and complicated devices for measuring. A novel method to quickly calibrate the part coordinates was presented using only the internal encoder data of robot and coordinates transform calculation to get the coordinates transform matrix between the part frame and the basic frame of robot. It was easy to operate and its calibration result was precise. The method was embedded in the self developed off line programming software for MOTO-MAN SK6 arc welding robot. Based on the algorithm and off line programming, robot writing was realized. Experimental results showed the validity of the calibration method.

Keywords robot part frame calibration off line programming

Diffusion behaviour analysis of TiG welded joint between dissimilar materials Mg and Al

WANG Heng LIU Liming LIU Xu jing
(Materials Modification National Key Laboratory by Laser Ion and Electron Beams Dalian University of Technology Dalian 116024 China). p5 - 8

Abstract Modern analytical methods have been used to investigate the patterns of fusion zone and the diffusion behaviors of elements by TiG direct welding and TiG with Sn as transition layer welding. The result shows that there is an obvious interface between Mg and Al base metal when they are welded directly. The element of Mg diffuses into Al base metal and forms a diffusion layer but at the same time there is only a little element of Al diffusing into Mg base metal. The Mg diffused into Al base metal can combine with Al and form $Mg_{17}Al_2$ and $\beta-AlMg$ phases which will cause the rupture of diffusion layer easily. TiG with Sn as transition layer welding as a fusion braze welding method forms a Sn transition zone with different components diffusion organizations and different performances between Sn and base metal. The Sn transition zone is narrower than the diffusion layer of TiG direct welding which has brought constraining force on welded joint and hampered the diffusion of Mg element into Al base metal. The Sn transition zone takes the blocking effect on the direct contact between Mg and Al.

Keywords TiG; dissimilar materials Mg and Al diffusion

The human simulation intelligent control of force telepresence in remote welding LIU Li jun WU Lin(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China). p9 - 12

Abstract During remote welding to make an welding operator produce the telepresence dynamic sensing on the remote welding robot and location and enhance him to control remote welding process. This paper by analyzing force error target track in remote welding brought forward a human simulation intelligent control (HSIC) of force telepresence based on the proportional integral and differential (PID) control model of force telepresence in remote welding fulfilled the characteristic model characteristic identification characteristic memory multi model control and multi target decision-making of force HSIC in remote welding. By comparing the performance of PID controller with the HSIC on force telepresence the HSIC made the operator possess a better force telepresence gain his ability of control complex welding process and improve the remote welding quality and teleteaching efficiency.

Key words remote welding force telepresence human simulation intelligent control welding interference

Analysis of crack tip stress strain field and fracture parameter of welded joint with a crack on fusion line (I)

ZHANG Min^{1,2}, DING Fang¹, LU Zhen lin¹, XU De sheng², CHENG Zu ha²(1. Xi'an University of Technology Xi'an 710048 China 2. State Key Laboratory of Laser Technology Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074 China). p13 - 18

Abstract The strain stress distribution rules of welded joint containing a crack on fusion line was analyzed with finite element method. And furthermore two kinds of welded joints one with a crack in the middle of the seam and another on the fusion line were compared. The result showed that the crack structure of the former was the mode of pure I, but the latter was the mode of mixed I+II. Considering the expansion of crack tip displacement field the fracture parameter COD which was defined as the situation of fusion line containing crack was studied carefully. And more the first principal shear angles and the rates of two modes of mixed I+II were given out. In the end the influence of these factors and the complexities on the first principal shear angles of welded joint with a crack on fusion line were analyzed also.

Key words finite element method (FEM); I+II mode crack