

# 搅拌摩擦焊接机器人形变及 载荷控制方法研究\*

房立金<sup>1</sup>, 张月<sup>2</sup>, 徐晓辉<sup>3</sup>

(1. 东北大学机器人科学与工程学院, 沈阳 110819;

2. 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110819;

3. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

**[摘要]** 基于搅拌摩擦焊接中搅拌头受力数学模型, 利用 Ansys Workbench 建立了搅拌头的静力学模型。分析了焊接过程中前进阻力、侧向力、轴向力和扭矩对搅拌头应变影响, 仿真结果表明, 搅拌摩擦焊接过程中搅拌针的根部是主要的应力集中区域。合适的焊接方法与工艺对提高机器人搅拌摩擦焊接稳定性有很大帮助, 对搅拌摩擦焊点焊、优化搅拌头设计和焊接工艺参数、热源和超声辅助、反馈测量补偿搅拌摩擦焊、改进机器人结构刚度和精度等载荷控制方法进行了详细阐述。结合工业机器人整体刚性较弱、加工作业时易引发颤振、关节减速器内部齿隙较大, 提出了基于双电机传动的无间隙传动高刚性机械臂结构设计, 并对机械臂刚度特性进行分析。

**关键词:** 机器人; 搅拌摩擦焊接; 搅拌头; 传动间隙; 载荷控制; 刚度

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2020.09.014



房立金

教授、博导, 主要研究方向包括机器人仿生动力学控制、架空环境移动机器人、高精度加工作业机器人等。发表论文百余篇, 申请授权发明专利 40 项及实用新型专利 37 项。

工业机器人的刚度通常为数控机床刚度的 1/50<sup>[1-2]</sup>, 影响因素主要包括杆件柔性和关节柔性。杆件柔性为机械臂结构刚度较低导致, 特别是机器人手臂与小臂。关节柔性来源有减速器柔性、支撑轴承柔性、同步带及传动轴柔性等<sup>[3]</sup>。由于柔性原因, 加工作业的动态低频切削力作为激振力容易引起机器人颤振<sup>[4]</sup>。

传统加工领域, 数控机床仍是加工的主要装备, 工业机器人通常用于物料搬运、冲压压铸等简单操作<sup>[5-6]</sup>。机器人技术进步使其逐渐应用于铣削、钻孔、搅拌摩擦焊接等复杂的机械加工领域<sup>[7-9]</sup>。

工业机器人在进行机械加工时仍存在一些技术问题需要解决<sup>[10-11]</sup>。包括工业机器人刚性差、减速器齿隙影响机器人精度等, 这些问题对机器

人的精度均产生重要影响<sup>[12-13]</sup>。传统的串联工业机器人承载能力与刚度不足, 较难以承受搅拌摩擦焊所需的巨大工件顶锻力, 具有高刚度的并联机器人机构被越来越多地用作搅拌摩擦焊装备的主机构, 串、并联机器人机构运动副存在间隙, 随着作业时间的增加, 系统作业精度和动力学性能会受到负面影响。

基于传统工业机器人的刚度特性及在加工领域的应用与现状, 本文阐述了机器人搅拌摩擦焊接中搅拌头受力情况与作业载荷的控制方法, 设计了一种高刚性机械臂结构并分析了其刚度特性。

## 搅拌摩擦焊过程受力分析

### 1 搅拌头受力

受力数学模型见图 1。搅拌针和轴肩形状多样, 受力分析时不考虑

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51575092); 辽宁重大装备制造协同创新项目。

轴肩凹槽和搅拌针表面情况<sup>[14-15]</sup>。图2为搅拌针端面和轴肩。搅拌针轴肩与搅拌针端面承受平行于搅拌头轴线轴向力。假设搅拌针侧面前部受垂直于搅拌头轴线的压力,后部受力忽略不计,搅拌针侧面承受的摩擦力会产生与搅拌头旋转方向相反的扭矩。搅拌针侧面所受压力和摩擦力可以分解为与搅拌头轴线垂直和平行的两个分力。

搅拌针端面受到的平行于搅拌头轴线的轴向力为:

$$N_1 = \pi p R_1^2 \quad (1)$$

式中,  $p$  为稳定前行阶段轴向力, N;  $R_1$  为搅拌针端面半径, mm。

轴肩受到的平行于搅拌头轴线的轴向力为:

$$N_2 = \pi p (R_3^2 - R_2^2) \quad (2)$$

式中,  $R_2$  为搅拌针根部半径, mm;  $R_3$  为轴肩半径, mm。

搅拌针端面所受摩擦力产生与搅拌头旋转方向相反的扭矩为:

$$T_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} r \mu p r dr d\theta = \frac{2\pi \mu p R_1^3}{3} \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为稳定前行阶段摩擦系数;  $\theta$  为周向角。

轴肩所受摩擦力产生与搅拌头旋转方向相反的扭矩为:

$$T_2 = \int_0^{2\pi} \int_{R_2}^{R_3} r \mu p r dr d\theta = \frac{2\pi \mu p (R_3^3 - R_2^3)}{3} \quad (4)$$

搅拌针侧面前部所受轴向力分解成平行于搅拌头轴线向上的力为:

$$N_2 = 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \int_0^H p_1 (R + z \tan \alpha) \tan \alpha dz = \pi p R_1 H \tan \alpha + \frac{\pi p H^2 \tan^2 \alpha}{2} \quad (5)$$

式中,  $H$  为搅拌针长度, mm;  $\alpha$  为搅

拌针的锥度角。

搅拌针侧面前部所受轴向力分解成垂直于搅拌头轴线与前行方向相反的力为:

$$P_1 = 2 \left| \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \int_0^H p_1 (R + z \tan \alpha) \sin \theta dz \right| = 2\pi p R_1 H + p H^2 \tan^2 \alpha \quad (6)$$

$$h_1 = \frac{-2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + 4R_1 H \tan \alpha + 2H^2 \tan^2 \alpha}}{2 \tan \alpha} \quad (7)$$

## 2 搅拌头静力学模拟

根据实际作业工况为搅拌头施加轴向力、侧向力、前进阻力和扭矩。轴向力、前进阻力、侧向力施加值均为 2000N。施加扭矩值为 1N·m。

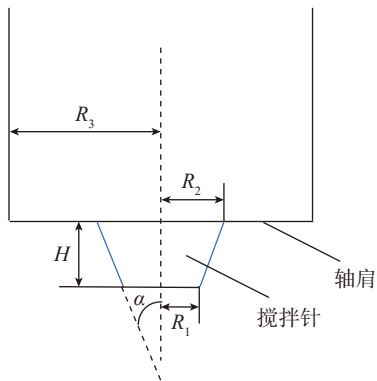


图1 搅拌头几何模型

Fig.1 Geometric model of stirring head

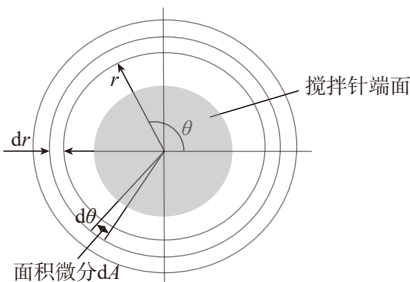


图2 搅拌针端面和轴肩

Fig.2 Stirring pin end face and shaft shoulder

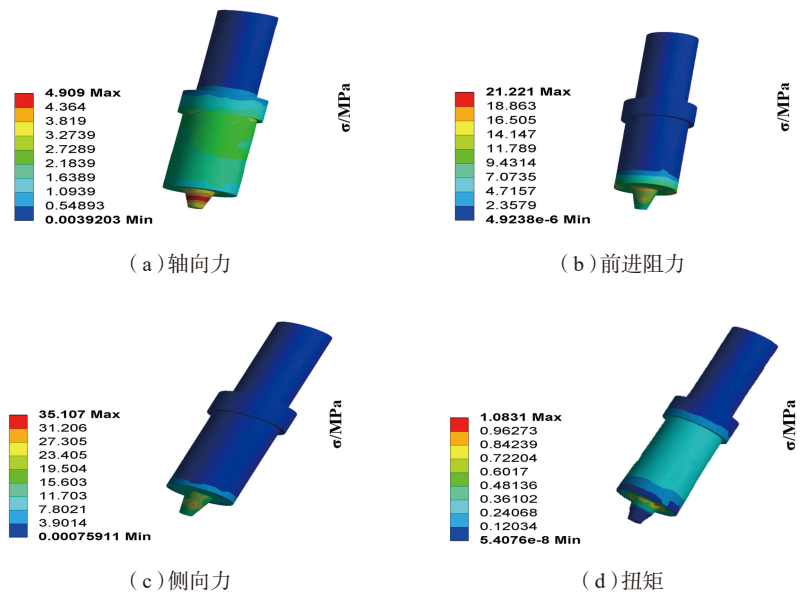


图3 静力学分析等效应力结果

Fig.3 Equivalent stress results of static analysis

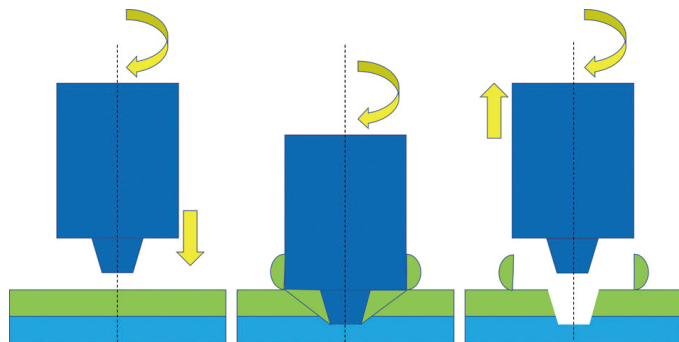


图4 搅拌摩擦焊点焊工艺

Fig.4 Friction stir spot welding process

图3等效力结果表明搅拌头应力集中区域主要出现在搅拌针根部。

### 机器人作业中的载荷控制方法

(1) 搅拌摩擦焊点焊。

搅拌摩擦焊点焊(图4)承受焊接作用力小,无前进阻力与侧向力,焊接过程较易控制<sup>[16]</sup>。

(2) 优化搅拌头设计。

TWI研发的凸轮形状搅拌头较

好地降低了前进阻力与轴向力(图5(a))<sup>[17]</sup>。研究表明一种外开螺纹型搅拌头可以改善作业时材料流动,降低焊接压力1/3(图5(b))<sup>[18]</sup>。

双轴肩搅拌摩擦焊可以形成闭合的内部力(图6)。TWI和NASA等研究表明搅拌头承受轴向力为常规搅拌摩擦焊的1/4<sup>[19]</sup>。

静止轴肩焊接(图7)时分体式搅拌头轴肩不产生摩擦热<sup>[20]</sup>,降低

了对加工设备刚性的要求,较适合机器人搅拌摩擦焊接作业。

无轴肩搅拌摩擦焊(图8)采用锥体状搅拌头同时起到搅拌针与轴肩作用。Lammlein等<sup>[21]</sup>采用无轴肩搅拌头焊接6061铝合金,轴向力为相同工况下常规搅拌头焊接的1/4。

(3) 焊接参数优化。

Hussein等<sup>[22]</sup>对6061-T6铝合金焊接发现,当搅拌头转速增大时轴向力明显减小。Widener<sup>[20]</sup>和Cook等<sup>[23]</sup>研究表明轴向力与旋转速度、轴肩下压量、焊接速度之间存在函数关系。搅拌头转速增大时搅拌头受力大幅降低,轴肩压入深度变化对轴向力有较大影响<sup>[24]</sup>。

(4) 热源辅助搅拌摩擦焊。

热源辅助搅拌摩擦焊(图9)可提供额外外部热量,搅拌头承受的轴向力和旋转扭矩大幅减少。激光、电磁感应热源搅拌摩擦焊相对于无辅助热源工艺,可减小1/3的轴向受力和前进阻力。

(5) 超声辅助搅拌摩擦焊。

超声辅助可以降低材料的屈服应力,超声振动一般施加于搅拌头(图10(a))或者直接施加于待焊材料(图10(b))。超声辅助可以提高焊缝拉伸强度和硬度,提高焊接质量。

(6) 反馈测量补偿搅拌摩擦焊。

Guillo等<sup>[9]</sup>采用反馈测量补偿搅拌摩擦焊接(图11)方法,基于焊接过程中的力测量,实时计算出修正后的路径,采用嵌入式实时补偿横向刀具偏差算法的机器人可以获得与龙门式数控系统相同的加工质量。

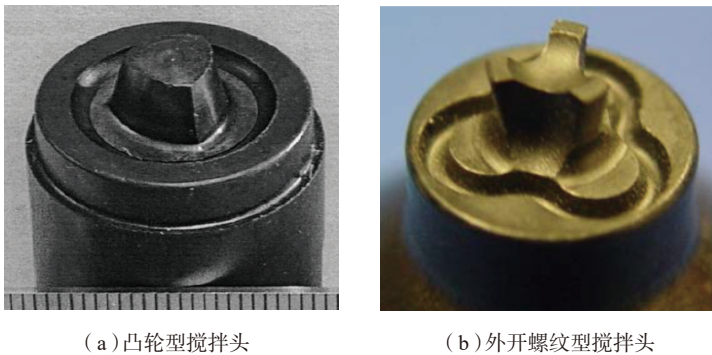


图5 搅拌头优化设计  
Fig.5 Optimized design of stirring head

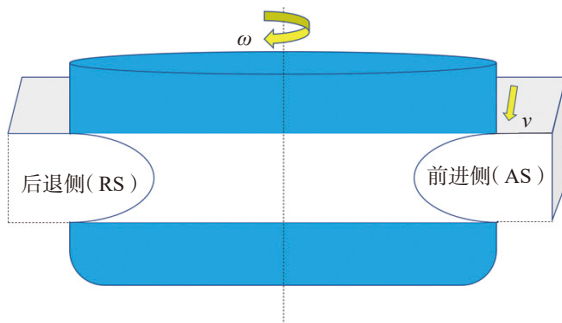


图6 双轴肩搅拌摩擦焊  
Fig.6 Biaxial shoulder friction stir welding

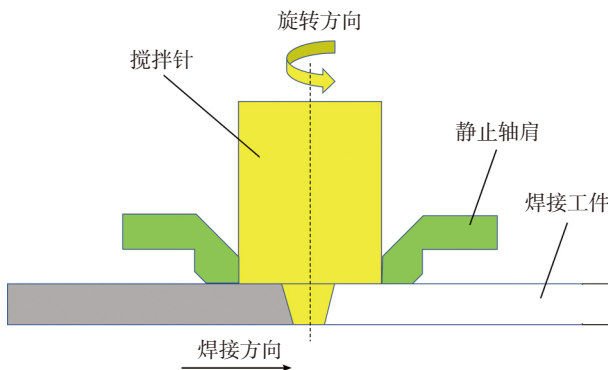


图7 静止轴肩焊接  
Fig.7 Welding of stationary shaft shoulder

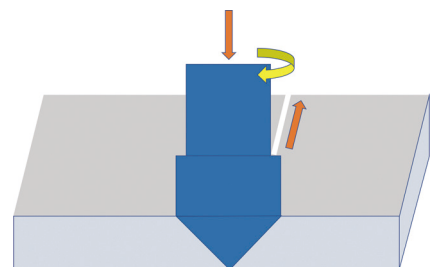


图8 无轴肩焊接  
Fig.8 Shaft-less shoulder welding

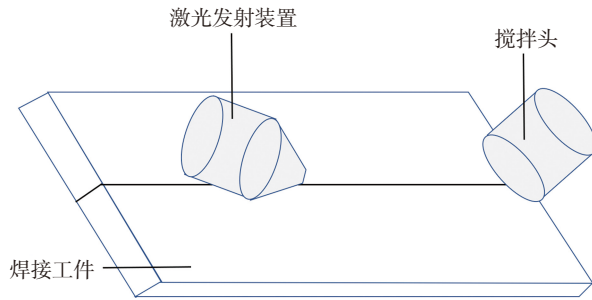
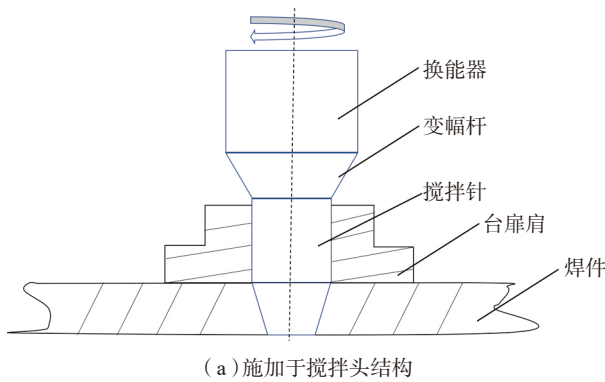
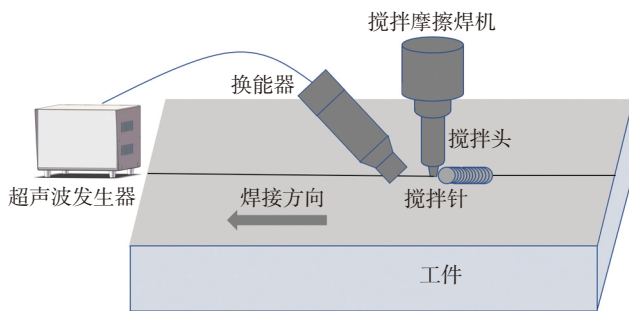


图9 激光辅助热源  
Fig.9 Laser-assisted heat source



(a) 施加于搅拌头结构



(b) 直接施加于工件

图10 超声辅助搅拌摩擦焊  
Fig.10 Ultrasonic assisted friction stir welding

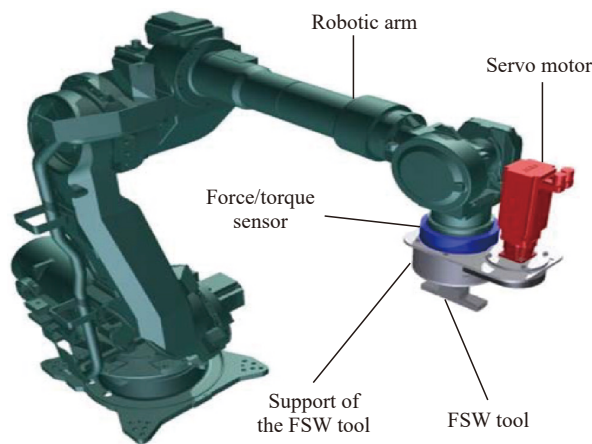


图11 反馈测量补偿搅拌摩擦焊  
Fig.11 Feedback measurement compensated friction stir welding

(7)改进机器人结构刚度和精度。

Bisu 等<sup>[25]</sup> 选用3组机器人姿态(图12),末端姿态不变位置依次远离基座。分析结果表明工业机器人姿态、刚度、频率特性存在耦合性,可通过调整姿态获得稳定的焊接状态。

实际加工作业时通常采用机械臂末端加装压脚机构施加稳定的预压力,压脚机构可以提高机器人系统整体刚性,有助于提高加工精度和加工过程稳定性。

### 面向搅拌摩擦焊的机器人设计

图13为本文提出的面向搅拌摩擦焊设计的3自由度机器人结构示意图。机器人主要由腕部、小臂、大臂、腰部、底座结构组成。机器人绕腰部可做回转运动,机械臂可在水平和竖直方向运动。

机器人底座结构如图14所示,由两台伺服电机<sup>[26-28]</sup>共同驱动对称布置在蜗轮两侧的蜗杆<sup>[29]</sup>来完成机器人腰部的回转运动。通过两台电机的主从消除控制可以消除蜗轮蜗杆副的传动间隙与增加机器人运动精度,较好地提升了机器人动态响应能力。机械臂执行部件电动缸采用滚珠丝杠驱动,通过双丝母预紧消除反向传动间隙并提高电动缸的等效刚度,实现机器人无间隙传动。

### 机器人刚度建模及刚度特性分析

利用有限元软件对机器人进行建模,机器人底座与地面固定连接,外部单向载荷作用于执行器末端。将电动缸的丝杠简化为等直径细长轴,将丝母简化为轴孔直径与轴径相等的中空柱体,通过调整丝母轴孔与丝杠轴的配合面积大小使电动缸的等效刚度仿真计算结果与实际刚度结果一致。

机器人在工作时主要受焊接轴向力和自身重力,设置重力加速度,在机

机器人末端沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向分别加载一个单向外荷载, 可以表示为:

$$F_e = [2000N \ 2000N \ 2000N]^T \quad (8)$$

选取机器人 3 个位姿  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ , 其中  $p_1$  和  $p_3$  为沿  $x$  轴方向能到达的极限位姿,  $p_2$  为大臂、小臂与  $z$  轴方

向平行时位姿, 分别分析得到机器人在外部载荷作用下沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的综合变形结果, 如图 15 所示。

通过计算分别得到相应位姿下机器人沿 3 个方向的刚度值, 如表 1 所示。

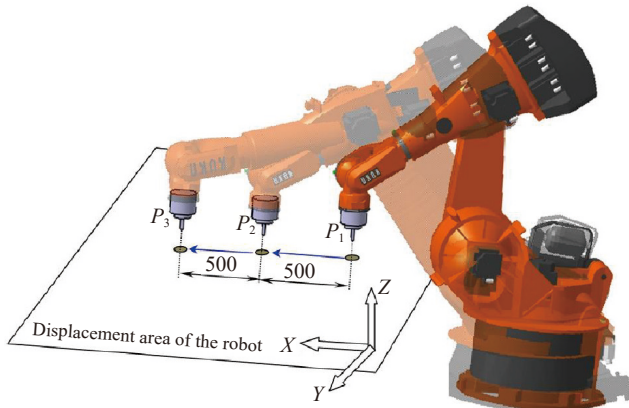


图12 机器人位姿变化  
Fig.12 Changes of robot pose

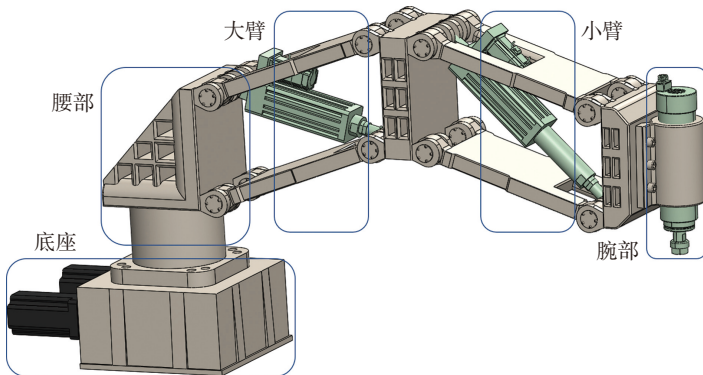


图13 机器人整体结构示意图  
Fig.13 Overall structure diagram of robot

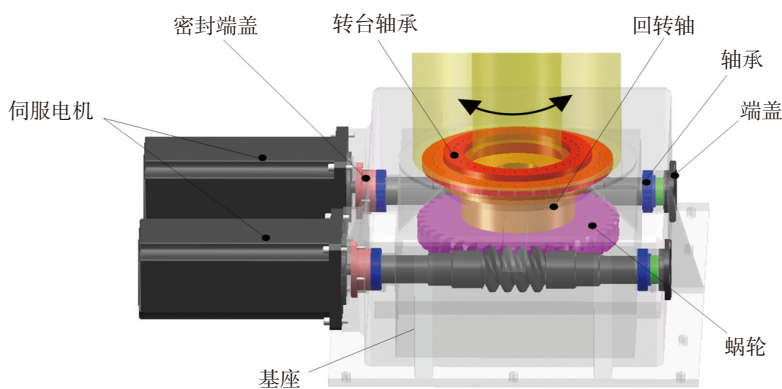
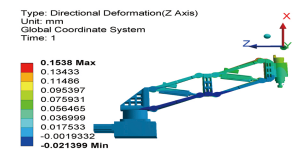
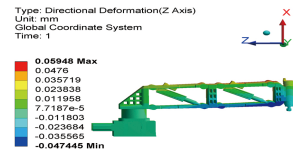


图14 底座回转单元  
Fig.14 Base turning unit



(a) 位姿  $p_1$  沿  $z$  方向变形



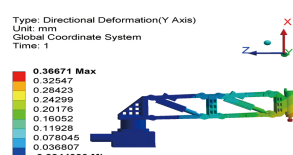
(b) 位姿  $p_2$  沿  $z$  方向变形



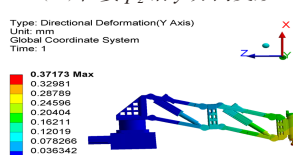
(c) 位姿  $p_3$  沿  $z$  方向变形



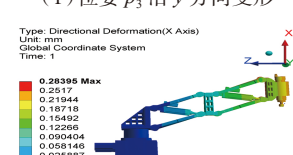
(d) 位姿  $p_1$  沿  $y$  方向变形



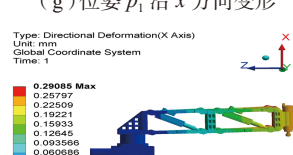
(e) 位姿  $p_2$  沿  $y$  方向变形



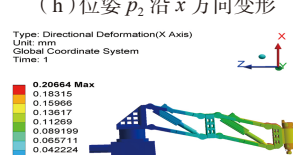
(f) 位姿  $p_3$  沿  $y$  方向变形



(g) 位姿  $p_1$  沿  $x$  方向变形



(h) 位姿  $p_2$  沿  $x$  方向变形



(i) 位姿  $p_3$  沿  $x$  方向变形

图15 整体变形云图  
Fig.15 Overall deformation cloud diagram

表1 机器人3个位姿下沿x、y、z向刚度值  
Table 1 Stiffness values along x、y、z direction of three robot poses  $N \cdot \mu m^{-1}$

位姿	z 向刚度	y 向刚度	x 向刚度
$p_1$	13.1	4.9	7.1
$p_2$	33.9	5.5	6.9
$p_3$	62.5	5.4	9.7

机器人加工作业时受位姿变化影响,沿z方向单向刚度变化情况较大,刚度值为13.1~62.5N/ $\mu m$ ,沿x方向单向和沿y方向单向刚度变化情况较小,沿x方向单向刚度值为6.9~9.7N/ $\mu m$ ,沿y方向单向刚度值为4.9~5.5N/ $\mu m$ ,机器人整体刚度性能优于传统工业机器人。

## 结论

搅拌头应变区域主要分布于搅拌针根部。扭矩与轴向力对应变影响相对较小,侧向力与前进阻力是主要原因。控制作业时侧向力与前进阻力可获取稳定的加工状态。

机器人搅拌摩擦焊匹配合适的焊接方法与工艺对提高焊接质量有很大帮助。机器人搅拌摩擦焊可采用搅拌摩擦焊点焊、优化搅拌头设计和焊接工艺参数、热源和超声辅助、反馈测量补偿搅拌摩擦焊、改进机器人结构和刚度等,控制搅拌摩擦焊接的载荷提高焊缝质量。

针对传统工业机器人存在关节间隙与刚性方面的不足,提出了一种高刚性机器人结构,分析表明机器人具有较好的整体刚度性能。

## 参考文献

[1] KARIM A, VERL A. Challenges and obstacles in robot-machining[C]//Proceedings of 44th International Symposium on Robotics. New York, 2013.  
[2] CHEN Y H, DONG F H. Robot machining: recent development and future research issues[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9-12): 1489-1497.

[3] BRES A, MONSARRA T B, DUBOURG L, et al. Simulation of friction stir welding using industrial robots[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2010, 37(1): 36-50.

[4] JOE W Y. Towards analysis and control of vibration driven robotic mechanism[C]//Proceedings of 12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. Goyang, 2015.

[5] LIU F F, LIN F. Time-jerk optimal planning of industrial robot trajectories[J]. International Journal of Robotics & Automation, 2016, 31(1): 1-7.

[6] ANDULKAR M V, CHIDDARWAR S S. Incremental approach for trajectory generation of spray painting robot[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2015, 42(3): 228-241.

[7] VOSNIAKOS G C, MATSAS E. Improving feasibility of robotic milling through robot placement optimisation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(5): 517-525.

[8] PAN Z X, ZHANG H. Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2008, 35(5): 400-409.

[9] GUILLO M, DUBOURG L. Impact & improvement of tool deviation in friction stir welding: weld quality & real-time compensation on an industrial robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 39: 22-31.

[10] KUBELA T, POCHYLY A, SINGULE V. Assessment of industrial robots accuracy in relation to accuracy improvement in machining processes[C]//Proceedings of IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference. Varna, 2016.

[11] SCHNEIDER U, ANSALONI M, DRUST M, et al. Experimental investigation of sources of error in robot machining[C]//

Proceedings of International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing. Porto, 2013.

[12] KARIM A, VERL A. Challenges and obstacles in robot-machining[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Robotics. Seoul, 2013.

[13] ZAEH M, ROESCH O. Improvement of the machining accuracy of milling robots[J]. Production Engineering, 2014, 8(6): 737-744.

[14] 张昭, 陈金涛, 张洪武. 搅拌摩擦焊过程中搅拌头受力与变形的计算方法[J]. 焊接, 2010(9): 29-32.

ZHANG Zhao, CHEN Jintao, ZHANG Hongwu. Calculation method of force and deformation of stirring head during friction stir welding[J]. Welding, 2010(9): 29-32.

[15] 万震宇, 张昭. 基于网格重剖分的搅拌摩擦焊接数值模拟及搅拌头受力分析[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2): 107-113.

WAN Zhenyu, ZHANG Zhao. Adaptive re-meshing based numerical simulation of friction stir welding and tool force analysis[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(2): 107-113.

[16] FUJIMOTO M. Friction stir spot welding: friction spot joining[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2009, 78(6): 520-523.

[17] COLEGROVE PA, SHERCLIFF H R. Development of Trivex friction stir welding tool part 1: two-dimensional flow modelling and experimental validation[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 9(4): 345-351.

[18] 王大勇, 冯吉才, 王攀峰. 搅拌摩擦焊用搅拌头研究现状与发展趋势[J]. 焊接, 2004(6): 6-10.

WANG Dayong, FENG Jicai, WANG Panfeng. Research status and trend of rotational tool used for friction stir welding[J]. Welding, 2004(6): 6-10.

[19] 张会杰, 王敏, 张景宝, 等. 低载荷搅拌摩擦焊工艺研究现状及趋势[J]. 焊接, 2014(4): 17-22.

ZHANG Huijie, WANG Min, ZHANG Jingbao, et al. Research status and trend of low-load friction stir welding process[J]. Welding, 2014(4): 17-22.

[20] WIDENER C A, TALIA J E, TWEEDY B M, et al. High-rotational speed friction stir welding with a fixed shoulder[C]//

Proceedings of 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur, 2006.

[21] LAMMLEIN D H, DELAPP D R, FLEMING P A, et al. The application of shoulderless conical tools in friction stir welding: an experimental and theoretical study[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(10): 4012–4022.

[22] HUSSEIN S A, TAHIR A S M, IZAMSHAH R. Generated forces and heat during the critical stages of friction stir welding and processing[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(10): 4319–4328.

[23] COOK G E, CRAWFORD R, CLARK D E, et al. Robotic friction stir welding[J]. *Industrial Robot*, 2004, 31(1): 55–63.

[24] LONGHURST W R, STRAUSS A M, COOK G E. The identification of the key

enablers for force control of robotic friction stir welding[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, 133(3): 255–267.

[25] BISU C F, CHERIF M, CERARD A, et al. Dynamic behavior analysis for a six axis industrial machining robot[J]. *Journal of Advanced Materials Research*, 2011, 423: 65–76.

[26] 房立金, 孙龙飞. 双电机驱动系统消隙特性研究[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(24): 2991–2996.

FANG Lijin, SUN Longfei. Backlash elimination characteristics of dual motor driving systems[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(24): 2991–2996.

[27] ROBERTZ S G, HALT L, KELKAR S, et al. Precise robot motions using dual motor control[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and

Automation. Anchorage, 2010.

[28] 薛汉杰. 双电机驱动消隙技术及其在数控设备中的应用[J]. *航空制造技术*, 2009, 52(17): 84–88.

XUE Hanjie. Double-motor anti-backlash driving technology and its application in NC machine tool[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, 52(17): 84–88.

[29] 周硕骏, 吴玉厚, 王卿源, 等. 双蜗轮蜗杆齿侧消隙传动机构的非线性动态特性研究[J]. *机械传动*, 2014, 38(10): 109–113.

ZHOU Shuojun, WU Yuhou, WANG Qingyuan, et al. Study on nonlinear dynamic characteristic of double worm gear anti-backlash drive mechanism[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2014, 38(10): 109–113.

通讯作者: 房立金, E-mail: ljfang@mail.neu.edu.cn。

## Research on Stiffness Characteristics and Load Control Method of Friction Stir Welding Robot

FANG Lijin<sup>1</sup>, ZHANG Yue<sup>2</sup>, XU Xiaohui<sup>3</sup>

(1. Faculty of Robot Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

**[ABSTRACT]** Based on the mathematical model of the force on the mixing head in friction stir welding, the static model of the mixing head was established by using Ansys Workbench. The influence of forward resistance, lateral force, axial force and torque on the strain of the mixing head is analyzed. Suitable welding methods and processes are of great help to improve the stability of robot friction stir welding, and the load control methods such as friction stir spot welding, optimizing mixing head design and welding process parameters, heat source and ultrasonic-assisted, feedback measurement and compensation friction stir welding, as well as the improvement of robot structural stiffness and accuracy are described in detail. In combination with the weak overall rigidity of industrial robot, easy to cause flutter during processing, and large internal tooth gap of joint reducer, a high rigid mechanical arm with non-clearance drive based on dual motor drive is proposed, and the stiffness characteristics of the mechanical arm are discussed.

**Keywords:** Robot; Friction stir welding; Mixing head; Transmission clearance; Load control; Stiffness

(责编 李丹)