

# 提高机器人结构刚度及关节精度的方法\*

房立金<sup>1</sup>, 孙龙飞<sup>2</sup>, 许继谦<sup>1</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)

**[摘要]** 传统工业机器人具有工作空间大、结构紧凑、灵活性好等优势,已由早期的物料搬运、点焊、喷涂等操作逐渐应用于制孔、铣削、磨削等高精度金属切削加工领域。然而,工业机器人相比于机床刚性较弱,金属切削过程中的切削载荷使机器人末端刀具偏离期望的加工轨迹,外部激振力极易引发机器人颤振,影响机器人加工精度;此外,关节减速器内部齿隙也会严重影响机器人精度。对采用机器人刚度优化、机器人加工误差补偿、机器人传动间隙补偿、机器人加工振动抑制等提高机器人精度方法的研究现状做了总结,提出了两种提高机器人精度的机器人结构改进设计,分别为基于双电机驱动的无间隙传动机器人结构和基于四边形机构的高刚性机械臂结构,并对新型机器人的结构特点进行了阐述。

**关键词:** 工业机器人;加工精度;结构刚度;关节精度;传动间隙;消除

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.04.034



房立金

教授、博士研究生导师,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。

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

金属切削机床是机械加工的主要设备,工业机器人主要用于物料搬运、点焊、喷涂等操作<sup>[1-3]</sup>。目前,航空航天、船舶、高铁等领域需要在装配现场开展大量制孔、磨削、铣削等切削加工,并且需要装配的零部件通常尺寸较大,工装设备复杂,传统的多轴数控加工中心占地面积较大、灵活性不高,往往无法适应此类大型复杂结构件的现场加工需求。工业机器人工作空间大、结构紧凑、灵活性好,可以弥补机床的不足,由此工业机器人已由早期的简单操作逐渐应用于铣削、钻孔、磨削等高精度金属切削加工领域<sup>[4-6]</sup>,然而使用工业机器人进行机械加工仍存在一些技术问题需要解决。

影响工业机器人加工精度的因素主要包括以下几个方面:(1)关节减速器的刚性较弱导致机器人整体

刚性变差<sup>[7]</sup>。一般地,大型工业机器人的刚度通常低于 $1\text{N}/\mu\text{m}$ ,而数控机床的刚度通常大于 $50\text{N}/\mu\text{m}$ <sup>[8-9]</sup>。机器人在大负载切削加工时末端刀具严重偏离期望加工运动轨迹,直接影响机器人的加工精度。(2)工业机器人加工中因机械臂处于悬臂状态导致机器人自身刚性较差,成为加工系统柔性的主要来源,同时也成为产生振动的主体,因此加工的动态低频切削力作为激振力也极易引发机器人颤振<sup>[10]</sup>,影响工件加工表面质量。(3)减速器内部齿隙不仅影响机器人的加工精度,也会因为外部载荷方向的快速改变引发机器人振动<sup>[11]</sup>。

通过优化机器人姿态可以在一定程度上提升机器人刚度,但对机器人刚度的提升能力有限。工业机器人的刚度主要取决于关节减速器的

刚度,然而提升现有减速器结构刚度的难度很大。此外,通过提升减速器传动部件精度可以在一定程度上提高机器人精度,但会带来减速器成本的增加,而且即使高精度减速器也无法消除内部的传动间隙。

本文介绍了通过优化机器人刚度,补偿机器人加工误差及传动间隙,抑制机器人加工振动提高机器人加工精度方法的研究现状。提出了提高机器人加工精度的两种途径,分别为提高机器人的关节传动精度和提升机器人的整体刚性。设计了基于双电机驱动的无间隙传动机器人结构和基于四边形机构的高刚性机械臂结构,并对新型机器人的结构特点进行了阐述。

## 提高机器人加工精度方法的研究现状

影响机器人加工精度的因素包括:系统刚度、传动间隙、机器人振动等,这些因素限制了机器人在精密制造领域的应用。研究人员对如何提高机器人加工精度做了大量研究。

### 1 机器人刚度的优化方法

刚度是影响机器人加工性能的重要指标。南京航空航天大学的 Bu 等<sup>[12]</sup>基于机器人钻孔加工系统中工业机器人的柔性模型,定义了机器人加工性能的定量评价指标。通过选择优化性能指标的刀具姿态进行钻孔作业,保证沉头孔加工深度和孔的轴向精度。图 1(a)为钻孔机器人的初始姿态,图 1(b)为机器人优化后的姿态。此外,通过机器人末端钻孔执行器施加压紧力可以提高系统的整体刚性,有效地提高了钻孔稳定性和孔径加工精度。

Palpacelli<sup>[13]</sup>提出采用绳驱动的冗余驱动方式提升机器人的静态特性及刚度特性,如图 2(a)所示,该方法主要针对大载荷加工。图 2(b)为冗余驱动在 Tricept 系统中的应用。然而,绳索冗余驱动限制了机器人的

工作范围。

### 2 机器人加工误差的补偿方法

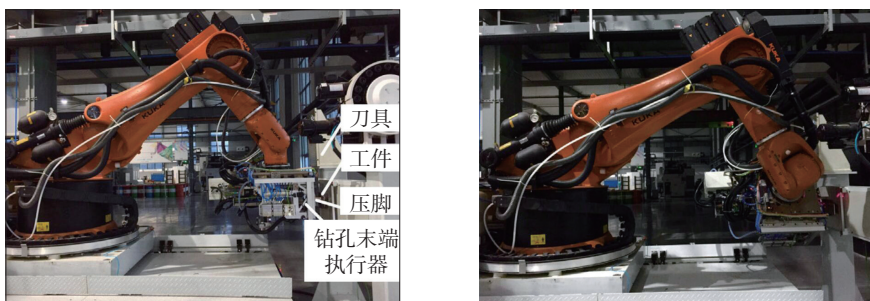
工业机器人的低刚性导致机器人的绝对位置精度较低,仅通过优化机器人姿态等方式改善机器人的刚度无法满足加工精度要求。De Backer 等<sup>[14]</sup>提出基于机器人动态变形模型及嵌入机器人内部力传感器反馈的切削力,对刀具偏移量进行实时预测并在线补偿。Guillo 等<sup>[6]</sup>根据搅拌摩擦焊过程中机器人末端执行器内部压力传感器实时测量的外部载荷及试验辨识的机器人关节刚度,计算得到搅拌头的位置偏差,将位置偏差值的一部分作为补偿量对机器人进行实时位置补偿。Schneider 等<sup>[15]</sup>利用光学测量系统对机器人和微执行机构在线跟踪,将传统工业机器人与外部压电驱动补偿机构相结合实现工具与工件间相对位置误差的在线修正。对机器人的加工误差补偿需要获得准确的机器人模型,或者配合精密的外部测量设备,在一定程度上

上增加了补偿的难度及成本,此外,机器人加工误差量较大也会导致补偿效果不理想。

### 3 机器人传动间隙消除方法

齿隙广泛存在于机器人关节减速器,是影响传动系统动态性能和稳态精度的重要因素<sup>[16]</sup>。齿隙具有不可微的非线性特性,对齿隙的准确补偿难度较大。

双蜗杆蜗轮传动机械消隙方式主要应用于机器人的回转机构<sup>[17]</sup>,但机械消隙方式存在一定局限性。与机械消隙方法相比,双电机驱动消隙是一种较为先进的电气消隙控制方式。德国西门子公司在其数控系统 840D 中,通过在伺服控制回路中增加力矩补偿控制环节,将电机额定扭矩的一部分作为消隙偏置力矩,实现双电机主从消隙控制功能<sup>[18]</sup>。中科院沈阳自动化研究所设计了一种新型重载高精度机器人搅拌摩擦焊设备<sup>[19]</sup>,其中 A/B 轴双摆头的摆轴均采用双电机驱动且具备电气消隙能

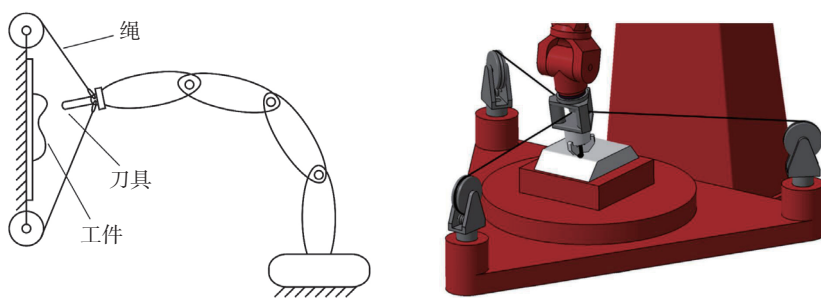


(a) 机器人初始姿态

(b) 机器人优化姿态

图1 机器人钻孔系统姿态

Fig.1 Robotic drilling posture before and after optimization



(a) 机器人冗余绳驱动

(b) 冗余 CDPM/Tricept 系统

图2 绳驱动冗余机器人系统

Fig.2 Redundant robot system driven by wires

力<sup>[20]</sup>。

#### 4 机器人加工振动的抑制方法

抑制机器人加工振动的方式主要包括主动控制和被动控制两种,主动振动抑制是将前馈控制和反馈控制相结合来抑制振动<sup>[21-23]</sup>,被动振动抑制是通过增加机器人的整体刚度来实现。

通过在机器人末端安装压脚装置来增加系统的动态刚度来提高机器人制孔精度和稳定性的方法较为常见<sup>[24]</sup>。费少华等<sup>[25]</sup>提出将末端执行器压脚位移作为实时补偿信号,根据制孔过程中压脚振动的频率特性引入低通滤波器来提高镗窝深度及加工孔表面质量。文献[26]研究了机器人镗孔加工的颤振机理及采用压脚的镗孔稳定性。文献[27]利用压脚与工件接触面之间的摩擦力平衡动态切削力来达到抑制振动的目的。对于薄壁工件,压脚的压紧力过大会导致工件发生较大变形<sup>[28]</sup>。

### 基于双电机驱动的机器人关节及本体设计

课题组基于两个方面对机器人结构进行设计,一方面是消除传动间隙对机器人精度的影响,提高关节的传动精度;另一方面是通过结构设计在一定程度上提升机器人的整体

刚性。设计了高精度机器人关节结构,腕部结构和基于双电机驱动的六自由度机械臂以及基于四边形结构的五自由度无间隙传动机器人结构。

#### 1 机器人关节结构设计

图3所示为一种新型二自由度机器人关节结构。关节包括四组伺服电机及行星减速机构,驱动部件均安装于支撑件内部,其中两组电机对称布置在支撑件上下两端,并分别与小直齿轮联接,两小直齿轮分别与支撑架固连的大直齿轮啮合,两组电机共同驱动支撑架并带动输出法兰作俯仰运动。另外两组电机通过同步带将动力传送到支撑架内部的锥齿轮a和锥齿轮b,锥齿轮a和b同时与锥齿轮c啮合,共同驱动锥齿轮c及输出轴和输出法兰作回转运动。本关节结构与传统工业机器人5轴和6轴的关节运动方式相似,功能相同,不同之处在于本文的关节结构可以通过对每组驱动的两台电机加载消除控制消除关节内部的传动间隙,提高传动精度,关节的整体结构较为紧凑。

#### 2 机器人腕部结构设计

A/B轴摆头是五轴机床的核心功能部件,直接影响机床的加工性能<sup>[29]</sup>。在国外,经过多年的研究与发展,A/B双摆头技术相对成熟<sup>[30]</sup>,

国内针对双摆头的研究起步较晚,带A/B轴的五轴加工中心只有少数国内企业具有研发能力,沈阳机床VMC13120U是国内首台使用A/B双摆头的五轴联动加工中心,北京航空制造工程研究所为国内飞机制造工厂提供了带A/B双摆角铣头的机床产品<sup>[31]</sup>。目前,A/B双摆头主要采用双蜗杆蜗轮副消隙方式,蜗轮蜗杆磨损后产生的间隙无法自动补偿;摆头的摆角范围大多限制在 $\pm 30^\circ$ 以内,航空企业通常需要做大量的专用工装满足大角度切削加工要求<sup>[32]</sup>。课题组基于差动驱动原理设计了新型A/B双摆头结构,该结构可以作为机器人的腕部使用,整体结构如图4所示<sup>[33]</sup>。

双摆头的内部传动结构如图5所示。双摆头结构的传动部分主要由第一差动输入、第二差动输入和差动输出3部分组成。第一差动输入包含两台伺服电机及其驱动的主、从动蜗杆,蜗轮及锥齿轮;第二差动输入与第一差动输入部件关于U型支撑部件对称安装于U型支撑件的外侧;差动输出部分主要包含大、小锥齿轮及摆轴。双摆头的主轴部分位于U型支撑件外部并与摆轴联接,两个轴的第一级驱动均采用蜗轮蜗杆副传动,蜗轮通过联接轴将扭矩传

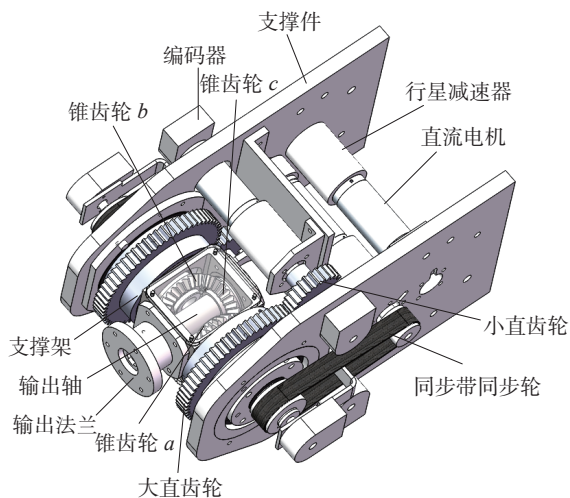


图3 二自由度机器人关节结构示意图  
Fig.3 Schematic diagram of the 2-DOF robotic joint

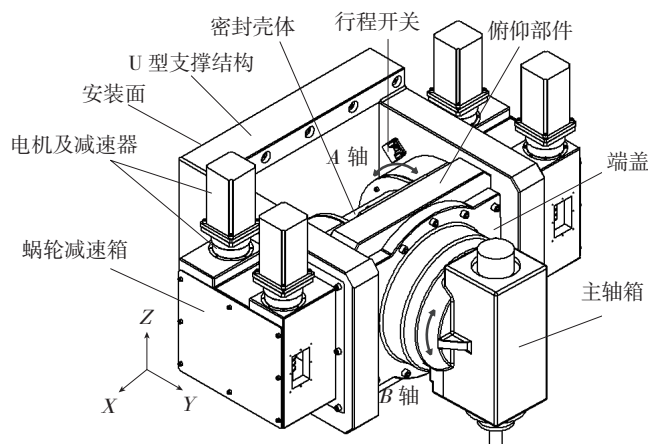


图4 机器人腕部整体结构示意图  
Fig.4 Schematic diagram of the robotic wrist

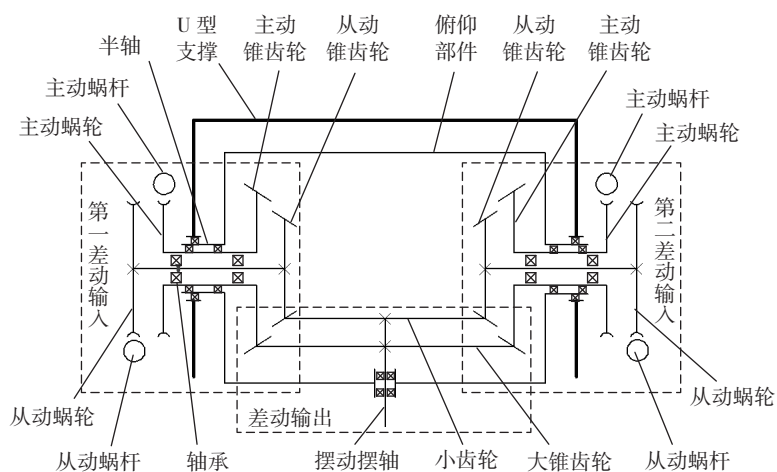


图5 双摆头内部传动结构示意图  
Fig.5 Schematic diagram of the structure in bi-rotary head

递给另一端的锥齿轮,并作用于摆轴上安装的两个锥齿轮。通过控制四台伺服电机的转速和转角可以实现双摆头的摆动和俯仰运动,即A轴和B轴的运动。

本文双摆头的主轴位于U型支撑外部,双摆头的摆动不受空间的限制,并且摆头的驱动电机及减速装置均固定于U型支撑而不参与摆头运动,摆头在摆动过程中无附加扭矩,因此以图4所示位置为摆头的零初始位置,差动双摆头可以实现 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 的摆轴运动范围,俯仰摆角范围可达 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。差动双摆头的摆角范围远大于现有的典型双摆头结构,可以有效扩大机床的加工范围。摆头的第一差动输入与第二差动输入分组采用双电机主从消除控制,使每组中的主动锥齿轮与被动锥齿轮间形成偏置力矩,差动输入锥齿轮反向啮合于差动输出锥齿轮以消除传动间隙。

### 3 六自由度机械臂结构设计

参考国内外典型的机械臂结构设计了基于双电机驱动的六自由度关节型机械臂,机械臂结构如图6所示,主要由腰关节、肩关节、肘关节和腕关节组成,其中腰部具有一个回转自由度,肩关节有一个回转自由度,肘关节有回转和俯仰两个自由度,腕

关节包含回转和俯仰两个自由度。机器人腰部和肩关节各由两台伺服电机驱动,肘关节和腕关节各由4台伺服电机驱动。机器人每个自由度的运动均采用双电机驱动,通过双电

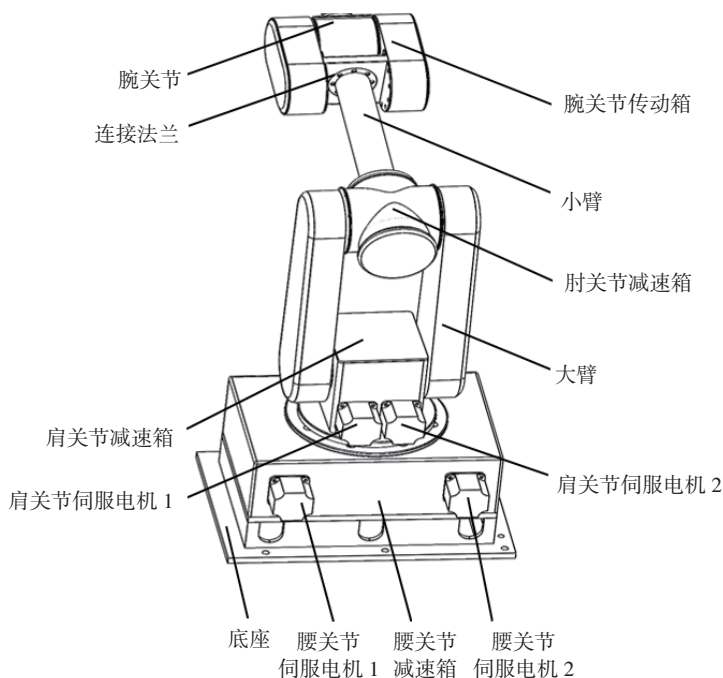


图6 机械手整体结构示意图  
Fig.6 Schematic diagram of the manipulator structure

表1 机器人关节运动范围 (°)

底座	肩关节	肘关节(俯仰)	肘关节(回转)	腕关节(俯仰)	腕关节(回转)
$\pm 170$	$+150 \sim 45$	$+190 \sim 70$	$\pm 180$	$\pm 125$	$\pm 360$

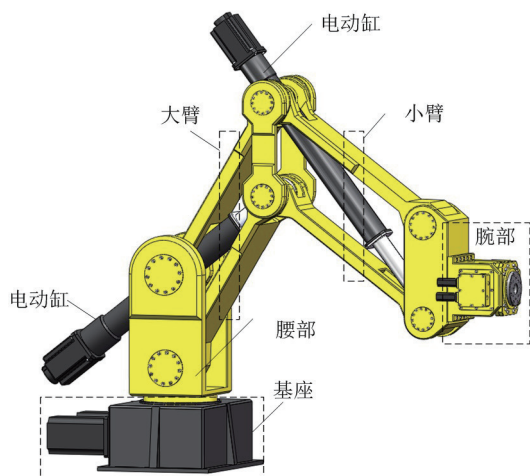


图7 新型工业机器人整体结构示意图  
Fig.7 Schematic diagram of the novel industrial robot

机器人腰部回转单元由伺服电机驱动蜗杆转动并带动蜗轮及立柱实现回转运动,采用双电机驱动的结构形式,即两台伺服电机与蜗杆分别对称布置在蜗轮的两侧,共同驱动蜗轮及机器人立柱完成回转动作,腰部回转单元内部结构如图8(a)所示。蜗轮蜗杆的大传动比可以代替减速器实现降低转速增加扭矩的作用。采用双电机驱动可以提升回转单元的驱动能力及响应特性,同时,通过双电机主从消除控制可以消除蜗轮蜗杆副的传动间隙,提高腰关节运动精度。机器人腕部与上文所述的双摆头驱动结构及消除原理相同,需将其进行小型化优化设计使其满足安装和使用要求,机器人腕部结构

如图8(b)所示。机械臂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。机器人可以实现无间隙传动。机器人大臂和小臂设计为平行四边形框架结构及电动缸对角驱动方式,平行四边形框架可以平衡机械臂外部等效弯矩负载,与传统工业机器人相比可以有效降低机械臂的驱动功率和能耗<sup>[35]</sup>。

机器人大臂和小臂平行四边形的长边为1000mm,短边为460mm。为了避免机械臂杆件与电动缸发生碰撞,结合机械臂的实际尺寸,机器人大臂运动角度区间为 $[-30^{\circ}, 65^{\circ}]$ ,小臂角度的区间为 $[0^{\circ}, -65^{\circ}]$ 的范围内,机械臂工作空

间在 $x-o-z$ 平面的投影,如图9所示。从实际应用角度出发,在工作空间的扇形区域内可以规划出由点 $P_1 \sim P_4$ 围成的 $800\text{mm} \times 600\text{mm}$ 规则矩形区域,该规则几何区域便于机器人进行机械加工。

图10所示为机器人原理样机,利用原理样机对机器人的刚度模型进行了试验验证。机器人在矩形区域内的刚度分布情况如图11所示。机器人的 $x$ 向刚度变化范围为 $7 \sim 375\text{N}/\mu\text{m}$ ;  $y$ 向刚度变化范围为 $57 \sim 99\text{N}/\mu\text{m}$ ;  $z$ 向刚度变化范围为 $24 \sim 39\text{N}/\mu\text{m}$ 。机器人的整体刚性优于传统工业机器人。

## 结论

(1) 机器人与金属切削机床相比具有工作空间大、灵活性好等优势,然而将工业机器人直接应用于机械加工领域还存在一些问题亟待解决。其中,机器人刚性较差和机器人关节的传动间隙是影响机器人加工精度的主要因素。

(2) 为了进一步提高机器人的精度,提出了两种提高机器人精度的机器人结构改进设计,分别为基于双电机驱动无间隙传动机器人结构和基于四边形机构的高刚性机械手结构。设计了具备消除能力的机器人关节结构和腕部结构,可以用于高精度多自由度机器人系统。基于双

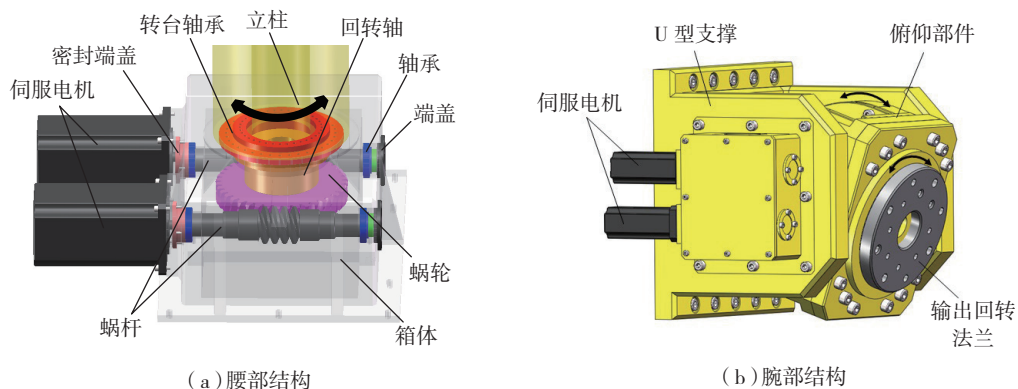


图8 机器人腰部及腕部结构示意图  
Fig.8 Schematic diagram of the robotic waist and wrist

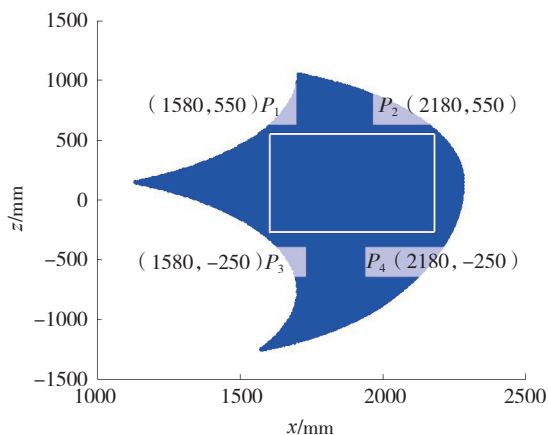


图9 机器人工作空间的 $x-o-z$ 平面投影  
Fig.9 Workspace projection in plane  $x-o-z$  of the robot

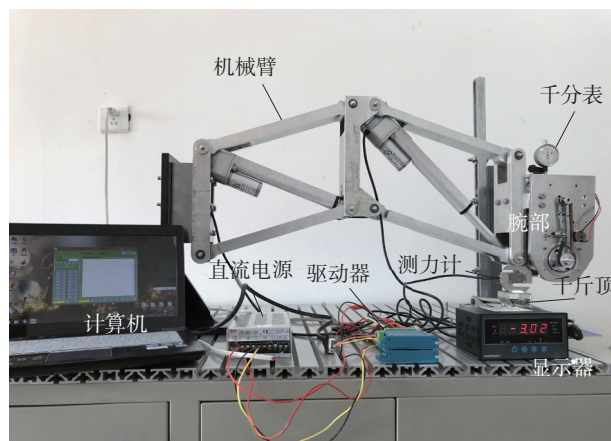


图10 机械臂刚度测量试验装置  
Fig.10 Stiffness measurement device of the robotic arm

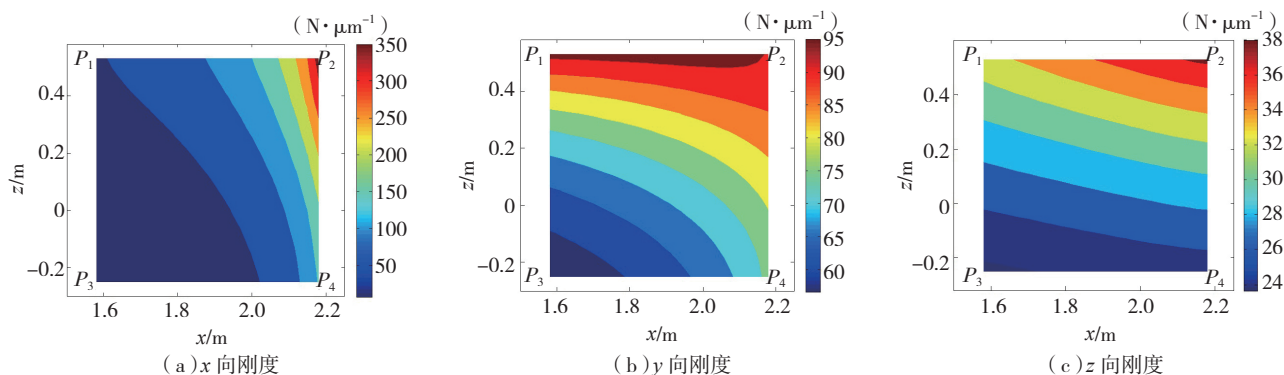


图11 机器人单向刚度分布图  
Fig.11 Directional stiffness of the proposed robot

电机驱动关节的6自由度机器人可以消除关节的传动间隙,采用平行四边形框架对角驱动机械臂的5自由度无间隙传动工业机器人具有较高的结构刚性,可有效提高机器人的精度,机器人能够满足切削载荷相对较小工况下的微切削加工需求。

### 参考文献

[1] 王田苗,陶永.我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J].机械工程学报,2014,50(9):1-13.  
WANG Tianmiao,TAO Yong. Research status and industrialization development strategy of Chinese industrial robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13.  
[2] LIU F F, LIN F. Time-jerk optimal planning of industrial robot trajectories[J]. International Journal of Robotics & Automation, 2016, 31(1): 1-7.

[3] ANDULKAR M V, CHIDDARWAR S. Incremental approach for trajectory generation of spray painting robot[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2015, 42(3): 228-241.  
[4] 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.  
[5] 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.  
[6] 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.  
[7] BRES A, MONSARRAT B, DUBOURG L, et al. Simulation of friction stir

welding using industrial robots[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2010, 37(1): 36-50.  
[8] KARIM A, VERL A. Challenges and obstacles in robot-machining[C]//IEEE. 2013 44TH International Symposium on Robotics. New York: IEEE, 2013:1-4.  
[9] 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.  
[10] 李超.某型飞机主起落架交点孔机器人镗孔加工系统稳定性研究[D].杭州:浙江大学,2015.  
LI Chao. Research on the stability of robot boring system of the aircraft landing gear's junction hole[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.  
[11] SCHNEIDER U, DRUST M, ANSALONI M, et al. Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation

- and modular compensation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4): 3-15.
- [12] BU Y, LIAO W H, TIAN W, et al. Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application[J]. Precision Engineering, 2017, 49: 388-400.
- [13] PALPACELLI M. Static performance improvement of an industrial robot by means of a cable-driven redundantly actuated system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 38: 1-8.
- [14] DE BACKER J, BOLMSJÖ G. Deflection model for robotic friction stir welding[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2014, 41(4): 365-372.
- [15] SCHNEIDER U, MOMENI-K M, ANSALONI M, et al. Stiffness modeling of industrial robots for deformation compensation in machining[C]// Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014:4464-4469.
- [16] 杜任慧, 吴益飞, 陈威, 等. 考虑齿隙伺服系统的反步自适应模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(2): 254-260.
- DU Renhui, WU Yifei, CHEN Wei, et al. Adaptive backstepping fuzzy control for servo systems with backlash[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(2): 254-260.
- [17] 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 characteristics of the double worm gear anti-backlash drive mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(10): 109-113.
- [18] 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, 91.
- XUE Hanjie. Double-motor anti-backlash driving technology and its application in NC machine tool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(17): 84-88, 91.
- [19] WU J F, ZHANG R, YANG G X. Design and experiment verification of a new heavy friction-stir-weld robot for large-scale complex surface structure[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2015, 42(4): 332-338.
- [20] LUO H T, XIAO L, WU J F, et al. Structure design and thermal analysis of a new type of friction stir weld spindle[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(5): 1-14.
- [21] ZHANG X, MILLS J K, CLEGHORN W L. Flexible linkage structural vibration control on a 3-PRR planar parallel manipulator: experimental results[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2009, 223(1): 71-84.
- [22] SHARON A, HOGAN N, HARDT D E. The macro/micro manipulator: an improved architecture for robot control[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1993, 10(3): 209-222.
- [23] NAGAOKA K, SATO T. Feedforward controller for continuous path control of CNC machine tools[J]. International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology, 2006, 7(8): 39-46.
- [24] 方强, 李超, 费少华, 等. 机器人镗孔加工系统稳定性分析[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 727-737.
- FANG Qiang, LI Chao, FEI Shaohua, et al. Stability analysis of robot boring system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 727-737.
- [25] 费少华, 方强, 孟祥磊, 等. 基于压脚位移补偿的机器人制孔镗窝深度控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(7): 1157-1161, 1181.
- FEI Shaohua, FANG Qiang, MENG Xianglei, et al. Countersink depth control of robot drilling based on pressure foot displacement compensation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(7): 1157-1161, 1181.
- [26] WANG G F, DONG H Y, GUO Y J, et al. Chatter mechanism and stability analysis of robotic boring[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1-4): 411-421.
- [27] GUO Y J, DONG H Y, WANG G F, et al. Vibration analysis and suppression in robotic boring process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 2016, 101: 102-110.
- [28] 马超虹. 压脚对机器人制孔影响的试验研究与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- MA Chaohong. Experiment study and analyze effect of pressure-foot on robot drilling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [29] YANG J X, ALTINTAS Y. A generalized on-line estimation and control of five-axis contouring errors of CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 2015, 88: 9-23.
- [30] 王卫朝, 李初晔. A/B双摆角数控万能铣头摆角力矩的计算研究[J]. 制造技术与机床, 2011(4): 40-44.
- WANG Weichao, LI Chuye. Research on calculating drive torque of milling head with A/B rotating axis[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2011(4): 40-44.
- [31] 姜超. 直驱式A/B摆角万能铣头的设计与研制[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.
- JIANG Chao. Direct-drive double pendulum angle milling head design and manufacture[D]. Beijing: Beihang University, 2014.
- [32] 刘峰, 高长才. 展望未来机床服务航空工业[J]. 航空制造技术, 2014, 57(11): 56-59.
- LIU Feng, GAO Changcai. Look forward for future machine tool, service for aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(11): 56-59.
- [33] 孙龙飞, 房立金. 一种新型差动驱动A/B双摆头设计[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(9): 1269-1273.
- SUN Longfei, FANG Lijin. Design of a novel A/B birotary head based on differential drive[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(9): 1269-1273.
- [34] FANG L J, SUN L F. Design of a novel robotic arm with non-backlash driving for friction stir welding process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5-8): 1637-1650.
- [35] 孙龙飞, 房立金. 机械手臂结构设计与其性能分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 402-410.
- SUN Longfei, FANG Lijin. Design and performance analysis of novel robotic arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 402-410.

通讯作者: 房立金, Email: ljfang@mail.neu.edu.cn. (下转第 59 页)