

# 一种轻量化五轴全并联加工机器人研发与应用

解增辉<sup>1</sup>, 梅斌<sup>1</sup>, 毕伟尧<sup>1</sup>, 谢福贵<sup>1,2</sup>, 刘辛军<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 航空结构件、涡轮叶片等具有空间自由曲面特征的复杂零件是国防、航空航天、能源等领域装备的核心零件, 通常具有材料去除率大、尺寸精度和表面质量要求高的特点。传统的串联式五轴加工中心在加工此类零件过程中会面临刀具过极点自动回转和驱动轴动态响应速率不匹配两个问题。针对上述问题, 从加工装备构型角度出发, 充分利用并联机器人在结构紧凑性、刚度、运动灵活性、动态响应速率等方面的优势, 开发了兼具姿态耦合运动和驱动轴动态响应速率匹配特点的轻量化五轴全并联加工机器人, 并开展了其优化设计、运动控制、精度保证等关键技术研究, 实现了复杂曲面零件的高效高质量加工, 最后在航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司进行应用验证。

**关键词:** 五轴并联加工机器人; 轻量化; 姿态耦合运动; 应用验证

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** A

**doi:**10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00237

## Development and application of a lightweight five-axis parallel machining robot

XIE Zenghui<sup>1</sup>, MEI Bin<sup>1</sup>, BI Weiyao<sup>1</sup>, XIE Fugui<sup>1,2</sup>, LIU Xin-Jun<sup>1,2</sup>

1. Department of Mechanical Engineering (DME), Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Beijing Key Lab of Precision/Ultra-precision Manufacturing Equipments and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** In the fields of national defense, aerospace, and energy, there exist plenty of complex surface core parts, for example, the aircraft structural components and turbine blades. These parts usually have the machining requirements of large material removal rate, high dimensional accuracy and high surface quality. The traditional five-axis serial machine centers face two problems in the machining process: (1) the tool will automatically rotate when it passes through the pole posture; (2) the driving axes' dynamic response does not match. It was tried to solve these problems from the view of machining equipments' configuration. By making fully use of the advantages of parallel robots in compact structure, high stiffness, kinematic flexibility and dynamic response, a lightweight five-axis parallel machining robot with attitude coupling motion and uniform driving axes' dynamic response was developed. The optimal design, motion control, and precision guarantee were carried out to realize the high-efficiency and high-quality machining of complex curved parts. Finally, the application verification in AVIC (Aviation Industry Corporation of China) Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd. was conducted.

**Key words:** five-axis parallel machining robot, lightweight, attitude coupling motion, application verification

### 1 引言

随着综合国力的迅速提升, 我国在国防、能源、

航空航天等技术领域不断取得重大突破, 关键装备的设计水平日趋成熟, 零件的复杂程度不断提高。涡轮叶片、整体叶盘、船用螺旋桨、航空结

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-05-07

通信作者: 刘辛军, xinjunliu@mail.tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51922057, No.91748205); 清华大学水木学者计划 (No.2021SM021)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.51922057, No.91748205), Shuimu Tsinghua Scholar Program (No.2021SM021)

构件等均为典型的具有空间自由曲面特征的复杂零件，这类零件通常具有材料去除率大、尺寸精度和表面质量要求高的特点，对其加工装备在复合角度加工、高效加工和高质量加工等方面的性能提出了苛刻要求<sup>[1-2]</sup>。

传统加工装备为串联式五轴加工中心，该类装备工作空间大、运动控制和精度保证技术相对成熟，已被大量应用于机械加工领域<sup>[3-4]</sup>。但由于该类机床采用串联式结构，其在应用过程中会面临刀具过极点自动回转和驱动轴动态响应速率不匹配两个问题。刀具过极点自动回转现象是由五轴串联机床的姿态合成运动特性造成的。这类机床刀具姿态的调整是通过两个串联摆动轴的合成运动实现的，姿态工作空间内部存在极点，极点姿态对应无数组运动学逆解。当刀具在极点处进行姿态调整时，即使是姿态的小幅度变化也可能会引起摆动轴的大范围运动<sup>[5-6]</sup>。驱动轴动态响应速率不匹配是由串联机床各驱动轴负载惯量差异大造成的。为了保证机床末端的承载能力，需要对驱动轴进行刚度设计，导致接近基座的驱动轴结构尺寸明显大于接近末端执行器的驱动轴结构尺寸，进而造成各轴负载惯量差异大，引起各驱动轴动态响应速率不匹配，影响联动精度，制约了机床高速加工时的性能<sup>[7-8]</sup>。

为了解决五轴串联机床在实际应用中面临的上述问题，学者们认识到可以从加工装备构型角度出发，利用并联机构在结构紧凑性、运动灵活性、动态响应速率等方面的优势，研究新型的5自由度新机构，开发高性能并/混联加工装备<sup>[9]</sup>，弥补串联机床在姿态调整效率、动态响应速率和刚度质量比等方面的劣势<sup>[10]</sup>。

西班牙 Loxin（龙信）公司开发了 Tricept 系列混联加工机器人<sup>[11]</sup>，解决了串联机床驱动轴动态响应不匹配的问题。混联加工机器人 Tricept 如图 1 所示，该机器人采用“两转一移（2R1T）并联机构+AC 摆角头”的混联机构构型，其并联模块为 3-UPS&PU 机构，3 条主动支链具有相同的轻量化结构形式，驱动轴间负载差异小，从而保证机器人可实现三维空间内的高效定位。但其刀具姿态调整是通过 AC 摆角头实现的，因此该混联机器人与串联机床相同，仍然面临刀具通过极点时姿态调整精度和效率难以保证的问题。



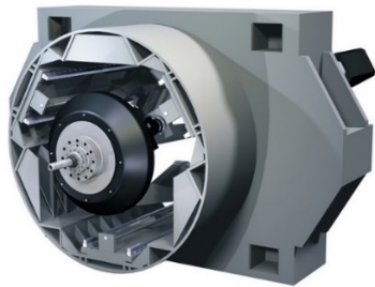
(a) Tricept T9000 整体外观



(b) 末端 AC 摆角头

图 1 混联加工机器人 Tricept<sup>[11]</sup>

混联机床 Ecospeed 如图 2 所示。德国 DS-Technologie 公司开发了具备 2R1T 自由度的并联摆角头 Sprint Z3，如图 2(a)所示；结合 2 自由度线性滑台构建了一套面向飞机结构件加工的五轴混联机床 Ecospeed<sup>[12]</sup>，整体外观如图 2(b)所示。该并联摆角头采用 3-PRS 构型，其姿态调整是通过 3 个运动链的耦合运动实现的，工作空间内部无极点，解决了传统五轴串联机床面临的刀具过极点自动回转问题，姿态调整精度和效率高。但该混联机床 X 向和 Y 向的移动自由度是通过线性滑台实现的，线性滑台与并联模块驱动轴负载惯量差异大，导致该混联机床面临驱动轴动态响应速率不匹配的问题，影响机床性能的进一步提升。



(a) 并联摆角头 Sprint Z3



(b) 五轴混联机床 Ecospeed 整体外观

图 2 混联机床 Ecospeed<sup>[12]</sup>

近年来,国内在并混联加工装备研制方面也取得了一定进展。天津大学采用 3-RPS 并联机构开发了 A3 摆角头,结合 2 自由度线性滑台研制了五轴加工机床<sup>[13]</sup>;清华大学提出了 3-P(Pa)S 并联机构,并基于此机构开发了五轴混联加工机床<sup>[14]</sup>;天津大学提出了一种 1T2R 并联机构,配合 AC 摆角头开发了混联加工机器人 TriMule<sup>[15-16]</sup>。

本文从构型创新角度出发,综合上述混联机构的优势,提出兼具姿态耦合运动和驱动轴动态响应速率匹配特点的五轴联动新构型,并研究其实用化进程中的优化设计、运动控制、精度保证等关键技术,最终研制高性能五轴并联加工机器人,并进行应用验证。

## 2 机器人运动学设计与样机研制

运动学设计包括构型设计和参数优化设计,是机器人/装备设计开发的主要环节之一,直接影响整机性能。本文采用基于 Grassmann 线几何和线图法的构型综合方法开展机器人构型设计<sup>[17-18]</sup>,具体过程如图 3 所示。为了适应复杂空间曲面的加工需求,机器人需要具备 5 自由度运动能力,此处采用 2T3R 机构自由度形式,根据对偶法则可得机构约束空间为图 3 中的一维力约束,将第 1 支链分配一维力约束,将第 2~5 支链设置为无约束支链。一维力约束可由空间 5 自由度 UCR 支链实现,该支链可提供作用点通过定平台固定点的约束力,便于机械结构设计和机构受力优化,并且通过简单的 R 副与动平台连接,便于实现机构的大摆角输出,其余 4 个支链均采用 6 自由度 UCU 无约束支链。因此,通过构型综合得到的 5 自由度全并联机构可描述为 4-UCU&UCR 机构,此处将基于该机构开发得到的机器人命名为 DiaRoM。该机器人通过多条支链的耦合运动实现动平台的平移和旋转自由度,姿态工作空间内部无极点,运动灵活性高,其运动部件惯量小且各驱动轴负载惯量差异小,因此,该机器人具有驱动轴动态响应速率匹配的特点。

参数优化设计涉及两个方面关键问题:尺度综合和性能评价。尺度综合是指通过一定的方法确定所设计机构的尺寸参数,而性能评价则是尺度综合的前提和先决条件。并联机构的本质功能是通过机构的内力将输入关节的运动传递到动平台,实现期望的输出运动,因此运动/力传递特性反映了并联机构的本质属性,是影响并联机器人最终性能的重要因素,本文采用运动/力传递指标开展参数优化设计<sup>[19-20]</sup>。

具体优化过程为:首先,将 CAD 模型参数化,

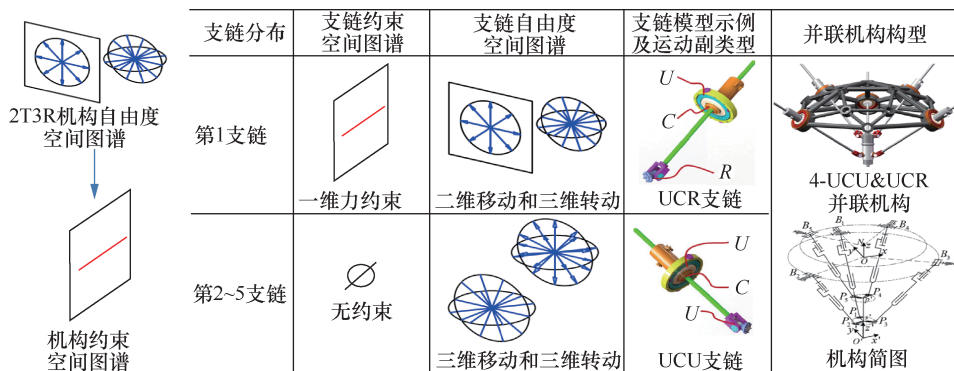


图 3 5 自由度并联机构构型综合过程

建立机器人的运动学模型，获取机器人末端位姿与支链长度之间的映射关系；然后，根据运动/力传递性能指标定义，求解给定位姿下的指标值，由上述构型综合过程可知，第1支链对机器人提供一个纯力约束  $f$ ，将其表示为约束力旋量

$$\mathbf{s}_{\text{CWS}} = (1, 0, 0; 0, 0, -R_1) \quad (1)$$

其中， $R_1$  为定平台半径。5个主动驱动移动副的输入运动和对应的传递力可以分别表示为输入运动旋量  $\mathbf{s}_{\text{ITS}}^j$  和传递力旋量  $\mathbf{s}_{\text{TWS}}^j$

$$\mathbf{s}_{\text{ITS}}^j = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{s}_{\text{ITS}}^1 = \left( \mathbf{0}; \frac{B_1 P_1}{|B_1 P_1|} \right) \\ \mathbf{s}_{\text{ITS}}^2 = \left( \mathbf{0}; \frac{B_2 P_2}{|B_2 P_2|} \right) \\ \mathbf{s}_{\text{ITS}}^3 = \left( \mathbf{0}; \frac{B_3 P_3}{|B_3 P_3|} \right) \\ \mathbf{s}_{\text{ITS}}^4 = \left( \mathbf{0}; \frac{B_4 P_4}{|B_4 P_4|} \right) \\ \mathbf{s}_{\text{ITS}}^5 = \left( \mathbf{0}; \frac{B_5 P_5}{|B_5 P_5|} \right) \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\mathbf{s}_{\text{TWS}}^j = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{s}_{\text{TWS}}^1 = \left( \frac{B_1 P_1}{|B_1 P_1|}; \frac{O' P_1 \times B_1 P_1}{|B_1 P_1|} \right) \\ \mathbf{s}_{\text{TWS}}^2 = \left( \frac{B_2 P_2}{|B_2 P_2|}; \frac{O' P_2 \times B_2 P_2}{|B_2 P_2|} \right) \\ \mathbf{s}_{\text{TWS}}^3 = \left( \frac{B_3 P_3}{|B_3 P_3|}; \frac{O' P_3 \times B_3 P_3}{|B_3 P_3|} \right) \\ \mathbf{s}_{\text{TWS}}^4 = \left( \frac{B_4 P_4}{|B_4 P_4|}; \frac{O' P_4 \times B_4 P_4}{|B_4 P_4|} \right) \\ \mathbf{s}_{\text{TWS}}^5 = \left( \frac{B_5 P_5}{|B_5 P_5|}; \frac{O' P_5 \times B_5 P_5}{|B_5 P_5|} \right) \end{array} \right.$$

根据式(3)可求出每个支链传递力对应的单位输出运动旋量  $\mathbf{s}_{\text{OTS}}^j$

$$\begin{cases} \mathbf{s}_{\text{OTS}}^j \circ \mathbf{s}_{\text{TWS}}^n = 0, j \neq n \\ \mathbf{s}_{\text{OTS}}^j \circ \mathbf{s}_{\text{CWS}} = 0 \end{cases}, j/n=1, \dots, 5 \quad (3)$$

则第  $j$  支链的输入传递指标为

$$\eta_j = \frac{|\mathbf{s}_{\text{ITS}}^j \circ \mathbf{s}_{\text{TWS}}^j|}{|\mathbf{s}_{\text{ITS}}^j \circ \mathbf{s}_{\text{TWS}}^j|_{\max}} \quad (4)$$

第  $j$  支链的输出传递指标为

$$\sigma_j = \frac{|\mathbf{s}_{\text{OTS}}^j \circ \mathbf{s}_{\text{TWS}}^j|}{|\mathbf{s}_{\text{OTS}}^j \circ \mathbf{s}_{\text{TWS}}^j|_{\max}} \quad (5)$$

其中， $\sigma_j \in (0, 1)$ ，且  $\sigma_j$  的值越大表示机构的输出运动/力传递特性越好。局部传递指标可表示为

$$\kappa = \min\{\eta_j, \sigma_j\} = \min\{\sigma_j\}, j=1, 2, 3, 4, 5 \quad (6)$$

以 A/B 联动  $30^\circ$  范围内均满足局部传递指标  $\kappa \geq 0.5$  的所有位置集合作为优质传递工作空间；最后，求解满足优质工作空间约束条件的机器人设计参数集合作为优质尺度域，并根据实际工程条件从优质尺度域中确定机器人的设计参数如下： $|OB_i|=1281 \text{ mm}$ ， $|NB_j|=1076 \text{ mm}$ ， $|s'P_i|=|p'P_j|=180 \text{ mm}$ ， $(i=1, 2, 3; j=4, 5)$ ， $|ON|=250 \text{ mm}$ ， $|s'p'|=340 \text{ mm}$ ， $\angle B_4 N B_5 = 80^\circ$ ， $\angle P_4 p' P_5 = 90^\circ$ ，从而完成并联加工机器人 DiaRoM 的参数优化设计，优化后传递性能指标在工作空间中的分布如图 4 所示。

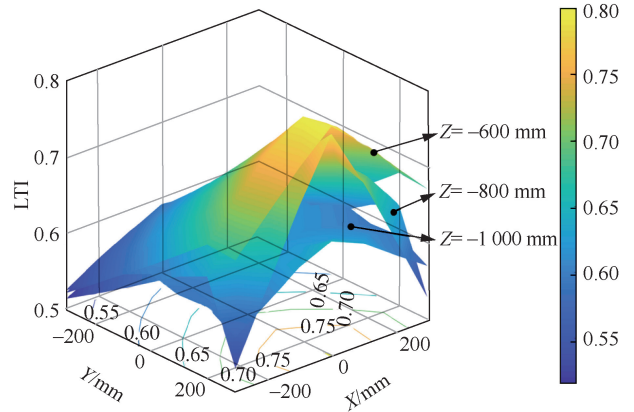


图4 优化后传递性能指标在工作空间中的分布

根据上述机器人构型设计和参数优化设计结果，构建了加工机器人数字化样机<sup>[21]</sup>，如图 5(a)所示。其机械部分包括轻量化机架、五组支链和一台主轴，每组支链由高功率密度电动滚珠丝杠驱动，电动滚珠丝杠通过高精度大中空虎克铰安装到机架上，通过紧凑型铰链安装到主轴上，从而实现由滚珠丝杠驱动的 UCR 和 UCU 支链，为了避免部件之间的干涉，根据动平台上的铰链中心点位置定制了主轴外形，从而减少中间过渡环节，简化机器人结构，减轻机器人重量；其电气控制部分采用高性能控制器实现机器人的实时运动控制，此外，还开发了加工工艺设计、后置处理算法、加工过程仿真、

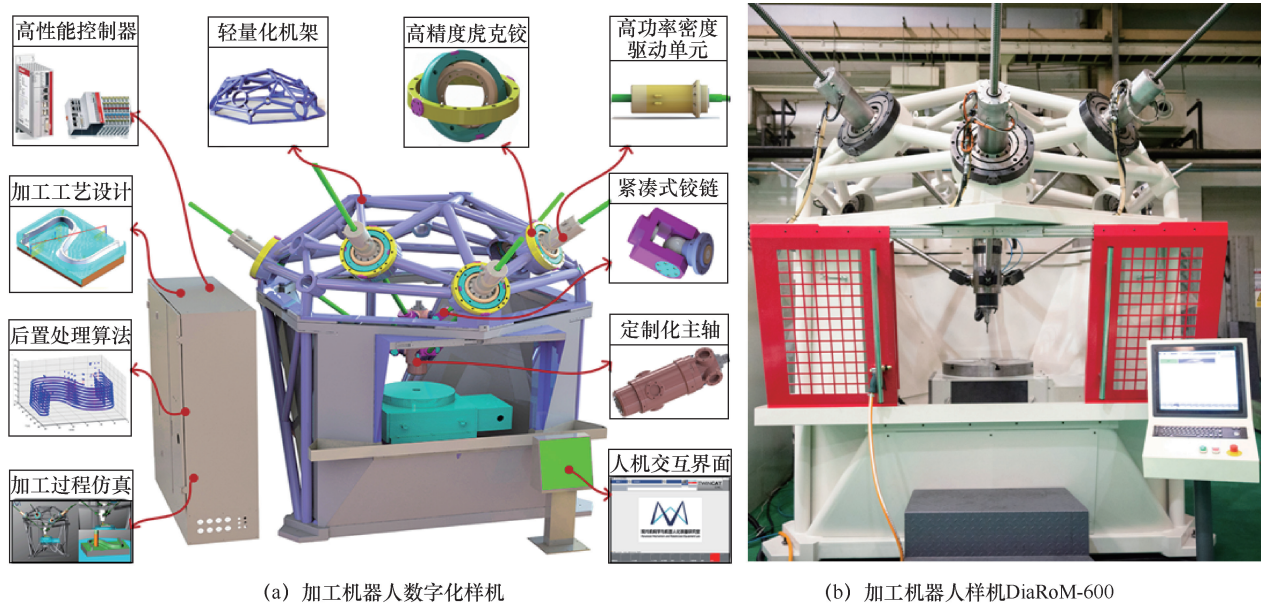


图5 五轴并联加工机器人 DiaRoM-600

人机交互界面等软件模块以实现机器人加工。基于此数字化模型，构建了一套加工机器人样机 DiaRoM-600，如图 5(b)所示，其性能参数如表 1 所示。机器人整体外形尺寸为直径 2.5 m、高 2.7 m，并联模块重量 800 kg，具有轻量化特征，其移动工作空间达到 600 mm×600 mm×400 mm，A/B 联动范围达到 30°，A 向转角输出能力大于 110°，可以实现立卧加工模式的转换，移动重复定位精度为 0.012 mm，转动重复定位精度为 0.003°。

表 1 并联加工机器人 DiaRoM-600 性能参数

项目	性能指标
外形尺寸	直径 2.5 m；高 2.7 m
自由度	并联加工模块 5 自由度转台 1 自由度
移动工作空间	600 mm×600 mm×400 mm
转动工作空间	A 向转角输出能力大于 110°，A/B 联动范围达到 30°
移动重复定位精度	0.012 mm
转动重复定位精度	0.003°
主轴功率	30 kW
并联模块重量	800 kg

### 3 机器人加工关键技术

#### 3.1 运动控制技术

加工机器人 DiaRoM-600 具有姿态耦合运动特性，姿态工作空间内部无极点，可实现灵活的五轴联动，适用于复杂曲面零件的高效高质量加工。但其多

轴耦合运动学特性以及非线性动力学特性，导致传统的运动控制方法与机器人性能不匹配，若直接将传统方法应用于并联加工机器人，会导致在机器人加工复杂零件时，出现控制精度不足、零件表面波纹、表面划痕等问题，不能充分发挥并联机器人高动态特性以及高灵活调姿能力，因此，需要研究其运动控制技术。

加工机器人运动控制主要包括以下 4 个步骤。

- 1) 在计算机辅助制造 (CAM, computer-aided manufacturing) 软件中设置工艺参数，获得刀位文件。
- 2) 进行刀具路径规划，将刀位文件中离散点位构成的折线路径转换成样条曲线加工路径。由于并联机器人具有姿态耦合运动特点，在姿态工作空间内部可沿任意方向进行灵活的姿态调整，因此，可采用刀轴矢量描述动平台姿态，并建立如下的刀具路径跨段三阶连续性约束条件

$$d\mathbf{P}(u)/ds = \mathbf{l}, \quad d^2\mathbf{P}(u)/ds^2 = \mathbf{0}, \quad d^3\mathbf{P}(u)/ds^3 = \mathbf{0} \quad (7)$$

其中， $\mathbf{P}(u)$  为参数化样条曲线方程， $s$  为样条曲线加工路径弧长， $\mathbf{l}$  为原始折线路径起止点处的单位方向向量。根据原始折线路径上的离散点和上述曲线拼接处的连续性条件构建方程，拟合刀具位置和单位刀轴矢量样条曲线，从而获得全局高阶连续的样条曲线加工路径<sup>[22]</sup>。

- 3) 建立并联机器人跟踪误差预估模型如下

$$E(s) = E_{\text{load}}(s) + E_{\text{input}}(s) = G_{\text{load}}(s)(K_{\text{t}}T_{\text{fr}}(s) - T_{\text{L}}(s)) + G_{\text{input}}(s)Q_{\text{d}}(s) \quad (8)$$

其中， $G_{load}(s)$  为与时变负载相关的误差传递函数， $E_{load}(s)$  为时变负载造成的跟踪误差，该部分跟踪误差是由于控制系统中增加的转矩前馈  $K_t T_{fr}$  与时变负载  $T_L$  之间的存在差异造成的； $G_{input}(s)$  为与输入信号相关的误差传递函数， $E_{input}(s)$  为由闭环反馈系统特性引起的跟踪误差，该部分跟踪误差为闭环反馈控制系统的固有属性，与驱动轴的期望位置  $q_d$ 、期望速度  $\dot{q}_d$ 、期望加速度  $\ddot{q}_d$  等输入运动信号相关。根据跟踪误差预估模型建立包括几何误差约束、工艺参数约束、电机跟踪精度约束和刀具跟踪精度约束的加工质量约束指标体系，确定路径上每点最高的进给速度，获得效率近似最优的速度曲线<sup>[23]</sup>。

4) 进行曲线插补获得加工轨迹，并控制机器人高精度跟踪插补得到的加工轨迹，最终实现高速高精度运动控制。

采用该方法对五轴框架零件的加工路径进行光滑处理，得到全局高阶连续的刀具路径，并开展了进给速度规划。规划后得到的框架类零件加工轨迹如图 6 所示，加工路径及路径上每点对应的进给速度如图 6(a) 所示，曲线插补得到的刀尖点位置和刀轴矢量轨迹如图 6(b) 所示。此处采用 T&T 角描述并联机器人姿态，当倾斜角  $\theta = 0^\circ$ ，方位角  $\phi$  可以是任意值，虽然在姿态运动曲线的  $\theta = 0^\circ$  处， $\phi$  出现跳变现象，但机器人实际运动状态是连续的。若采用传统方法进行规划，在  $\theta = 0^\circ$  附近进行姿态调整时，会消耗较长时间进行  $\phi$  角的连续调整，导致刀具运动出现明显的停顿感，并且在此处刀具沿微小倒锥面进行姿态调整，导致刀具路径失真。而本文提出的控制方法可以克服此问题，充分发挥并联机器人姿态耦合运动的优势，提高姿态调整精度和

效率。

### 3.2 精度保证技术

并联加工机器人 DiaRoM 通过 5 个电动滚珠丝杠驱动的支链控制末端动平台的运动，在实现了机器人轻量化设计的同时，给精度保证带来了难题：一方面，电机转动量和丝杠自转角度都会影响丝杠的移动量，因此，丝杠自转角度误差与主轴位姿误差耦合，导致机器人误差模型非常复杂；另一方面，在丝杠和主轴等部件的重力作用下，支链产生弹性变形，使得末端位姿产生误差，即结构误差与重力变形耦合影响主轴位姿误差。并联机器人运动学标定可以辨识和补偿结构误差，提高末端位姿精度，但只考虑刚性误差（结构误差项），忽略柔性误差（重力变形误差和刚度建模误差），会导致参数辨识不准确，限制机器人位姿精度的提升。

为了提高机器人精度，精确控制主轴位姿，需要辨识机器人真实参数，建立准确的运动学模型和刚度模型。因此，首先构建考虑并联加工机器人结构误差的运动学逆解，从丝杠自转角度误差中分离出位姿误差的耦合作用项，建立几何误差模型如下

$$J_p \delta p_s = J_r \delta r_s \quad (9)$$

其中， $\delta r_s$  是机器人结构误差向量， $\delta p_s$  是结构误差导致的主轴位置误差和姿态误差。结合力系平衡方程、虚功原理和胡克定律，建立机器人的刚度模型

$$C_p = J_f^{-T} C_q J_f^{-1} \quad (10)$$

其中， $C_p$  是机器人柔度矩阵， $C_q$  是支链柔度矩阵， $J_f$  是力雅克矩阵。根据刚度模型可以计算并联加工机器人的重力变形误差为

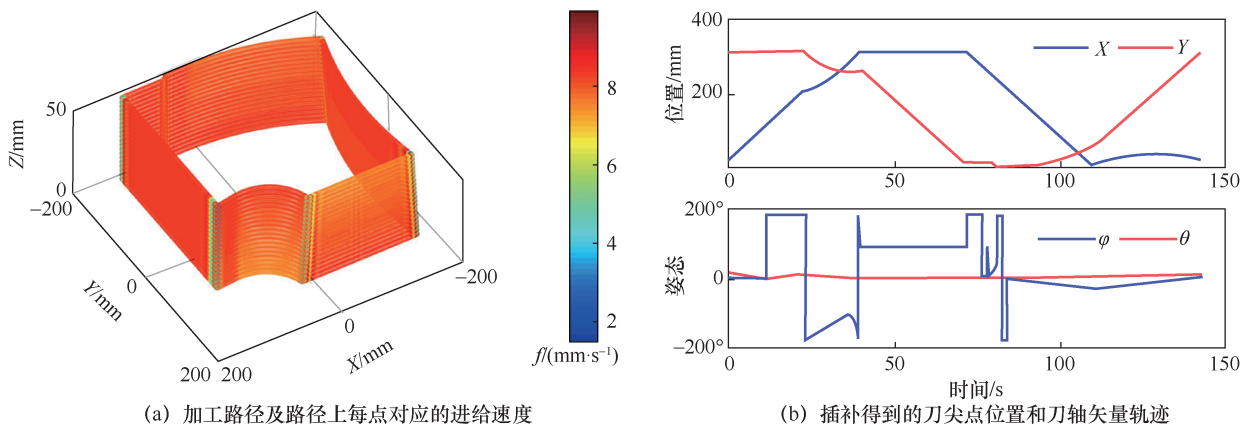


图 6 框架类零件加工轨迹

$$\Delta p = C_p \tau \quad (11)$$

其中,  $\Delta p$  是重力变形导致的主轴位姿误差,  $\tau$  是重力作用下的力矢量。考虑刚度建模误差, 在刚度模型中引入刚度参数误差, 得到刚度参数误差与末端位姿误差的映射方程为

$$\Delta p_c = J_{cq} \Delta c_q \quad (12)$$

其中,  $\Delta p_c$  是刚度参数误差导致的主轴位姿误差。最后综合并联加工机器人的几何误差模型、刚度模型和刚度参数误差方程, 建立刚柔耦合误差模型

$$\delta p_a = \begin{bmatrix} J_p^{-1} J_r & J_{cq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta r_s \\ \Delta c_q \end{bmatrix} + C_p \tau \quad (13)$$

其中,  $\delta r_s$  是机器人结构误差,  $\Delta c_q$  是刚度参数的误差,  $C_p \tau$  是重力变形导致的主轴位姿误差。结构误差是刚性误差, 重力变形误差和刚度参数误差是柔性误差, 因此, 上述刚柔耦合误差模型包含了结构误差、重力变形和刚度参数误差对位姿误差的耦合作用<sup>[24]</sup>。

根据上述刚柔耦合误差模型开展了并联加工机器人标定实验, 五轴全并联加工机器人标定前误差如图 7 所示。标定前定位误差如图 7(a)所示, 最

大误差 2.302 mm, 平均误差 1.113 mm, 均方差 0.437 mm。标定前姿态误差如图 7(b)所示, 最大误差 0.848°, 平均误差 0.381°, 均方差 0.174°。五轴全并联加工机器人标定后误差如图 8 所示, 机器人位姿精度得到了显著提升, 定位误差最大值 0.053 mm、平均值 0.02 mm、均方差 0.01 mm, 姿态误差最大值 0.021°、平均值 0.01°、均方差 0.006°。

#### 4 机器人应用验证

基于上述机器人运动控制和精度保证技术, 采用并联机器人 DiaRoM-600 加工了检测标准 ISO 10791-7:2020 中规定的 S 试件。被加工对象材料为航空铝 7075, 刀具采用直径为 12 mm 的 4 刃立铣刀, 加工过程工艺参数设置为: 切深 40 mm、切宽 0.1 mm、主轴转速 6 000 rpm, S 试件加工过程如图 9 所示。加工完成后对零件精度进行检测, 在 S 试件侧面缘条上均匀取 100 个检测点, 在三坐标测量机上测量检测点加工误差, S 试件检测点误差分布如图 10 所示, 检测点误差平均值为 0.021 mm, 均方差为 0.016 mm。

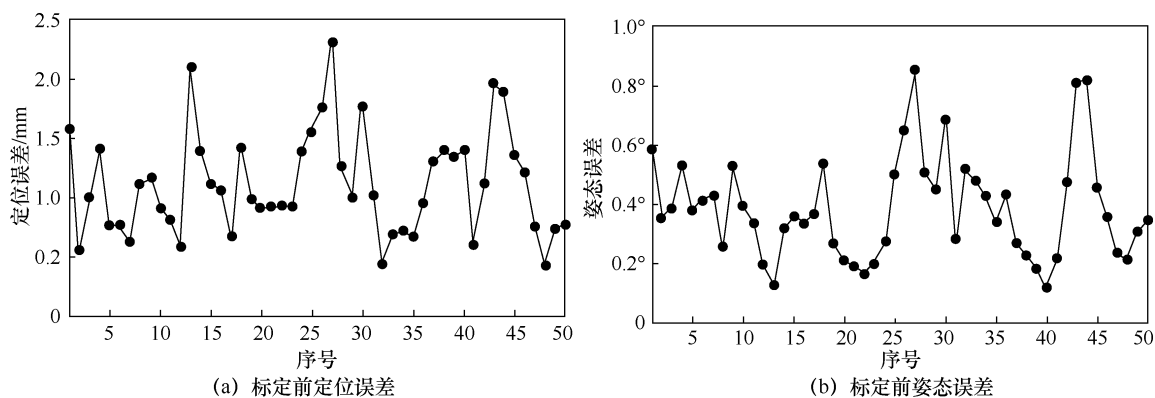


图7 五轴全并联加工机器人标定前误差

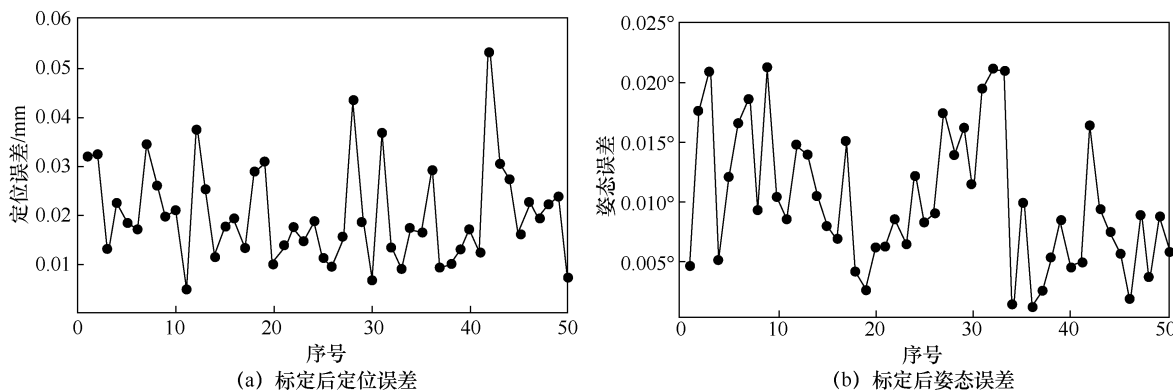


图8 五轴全并联加工机器人标定后误差

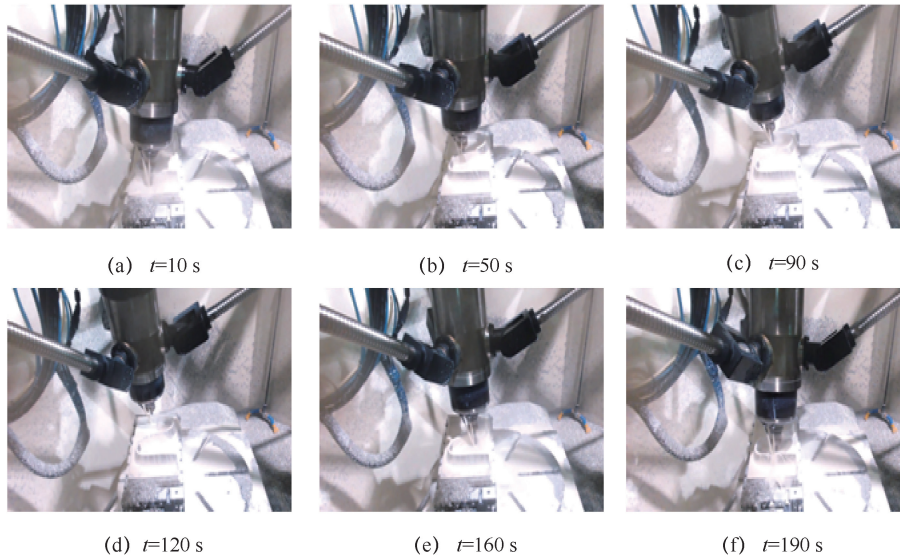


图 9 S 试件加工过程

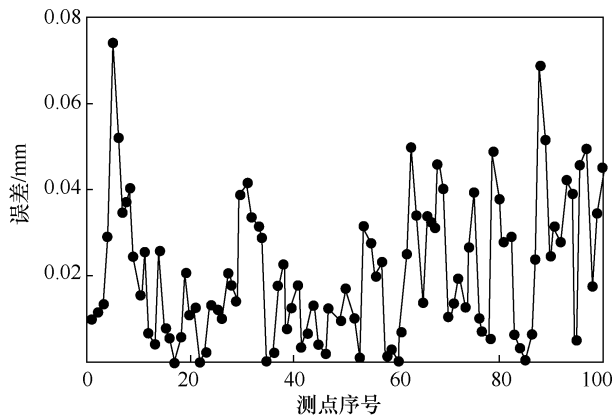


图 10 S 试件检测点误差分布

在航空工业成都飞机工业（集团）有限责任公司（以下简称航空工业成飞）进行机器人的应用验证，开展了框架类飞机薄壁结构件的加工。分别加工了壁厚 2 mm 和 4 mm、壁高 48 mm 的框架类零件，飞机框架类薄壁件加工过程如图 11 所示，框架类薄壁件及检测结果如图 12 所示。4 mm、2 mm 壁厚零件如图 12(a)和图 12(b)所示，在三坐标测量机上检测零件加工结果，检测点误差分布如图 12(c)和图 12(d)所示。在 4 mm 壁厚零件上检测 68 个点，检测点误差绝对值的平均值为 0.017 mm，误差绝对值大于 0.05 mm 的检测点 2 个，

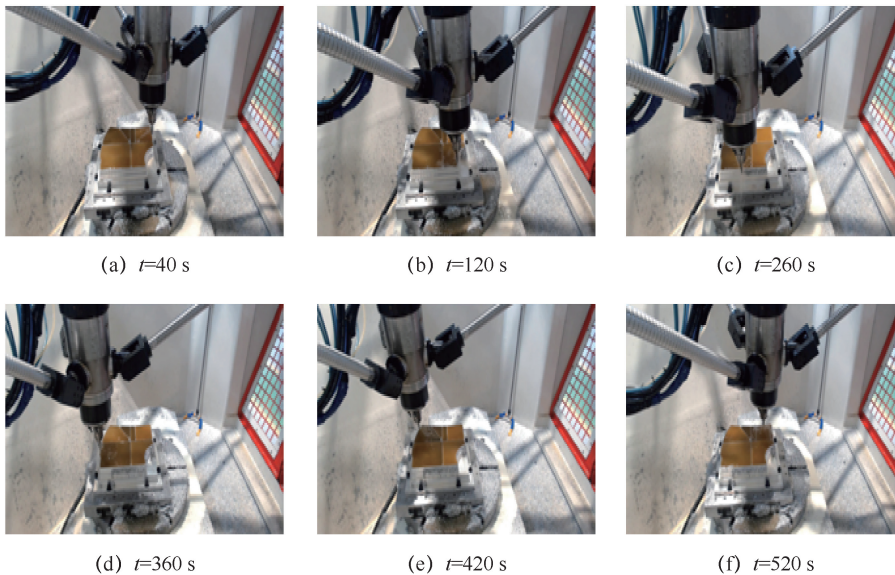
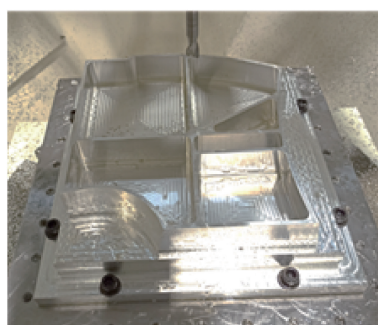
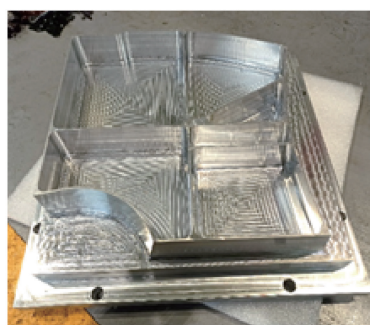


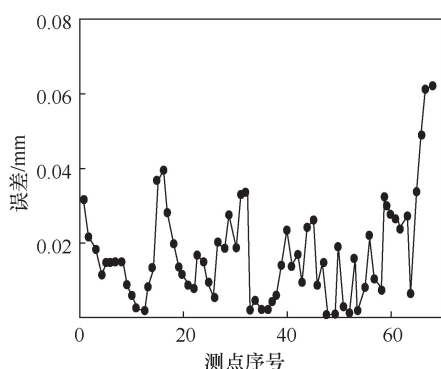
图 11 飞机框架类薄壁件加工过程



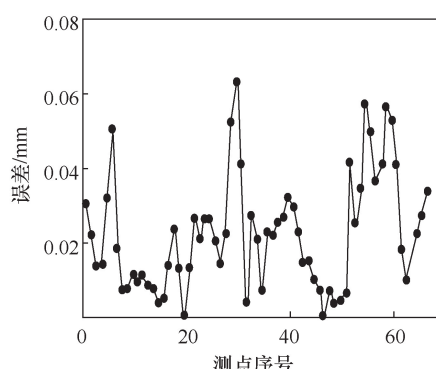
(a) 4 mm壁厚零件



(b) 2 mm壁厚零件



(c) 4 mm壁厚零件检测点误差分布



(d) 2 mm壁厚零件检测点误差分布

图 12 框架类薄壁件及检测结果

检测点误差绝对值最大为 0.062 mm。在 2 mm 壁厚零件上检测 67 个点，检测点误差绝对值的平均值为 0.022 mm，误差绝对值大于 0.05 mm 的检测点 6 个，误差绝对值大于 0.06 mm 的检测点 1 个，检测点误差绝对值最大为 0.063 mm。检测结果表明：框架类零件的加工精度远高于该类零件  $\pm 0.15$  mm 的精度要求。

上述应用验证结果说明，本文研发的五轴并联加工机器人可以满足航空结构件的加工精度需求，但由于该机器人工作空间为 600 mm×600 mm×400mm，仅能满足小型飞机零件的加工需求，具有大长宽比特点的飞机梁类零件则超出了本文研究对象 DiaRoM-600 的工作空间。因此，拟采用如图 13 所示的“大行程龙门+轻量化五轴全并联加工模块”的混联构型研制龙门桁架式加工机器人，采用龙门结构实现并联加工模块的大行程精确定位，利用并联机器人在结构紧凑性、运动灵活性、动态响应速率等方面的优势，进行框架类结构件的局部精细加工，从而实现大长宽比飞机结构件的一次成型，减少装卡停机时间，提升加工效率，且加工过程无须重复对刀，减少误差产生环节，提高加工精度。

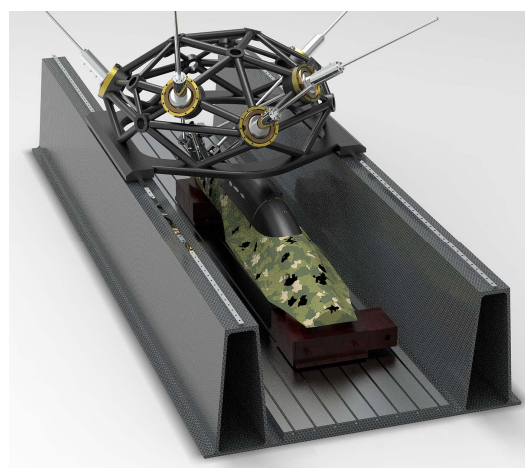


图 13 龙门桁架式混联加工机器人

## 5 结束语

本文围绕具有空间自由曲面特征复杂零件的高效高质量加工需求，从装备构型角度出发，充分发挥并联机构在结构紧凑性、运动灵活性、动态响应速率等方面的优势，提出了新型 5 自由度全并联机构，弥补串联机床结构在姿态调整效率、动态响应速率和刚度质量比等方面的劣势，研究其实用化进程中的优化设计、运动控制、精度保

证等关键技术,开发了高性能五轴并联加工机器人,并在航空工业成飞进行了应用验证。主要成果如下。

1)发明了兼具姿态耦合运动和驱动轴动态响应速率匹配特点的5自由度全并联机构,并基于运动/力传递性能指标完成了机器人的参数优化设计,根据构型设计和优化设计结果,开发了加工机器人DiaRoM-600;

2)建立了考虑并联机器人动力学性能的高速高精度运动控制方法,充分发挥其姿态耦合运动的优势,提升了机器人姿态调整精度和效率;

3)采用并联机器人刚柔耦合误差建模方法和加权正则化参数辨识方法开展标定,将机器人平均定位精度/姿态精度从1.113 mm/0.381°提升到0.02 mm/0.01°;

4)在航空工业成飞进行了并联加工机器人DiaRoM-600的应用验证,实现了S试件和飞机框架类零件的高效高质量加工。

#### 参考文献:

- [1] HODONOU C, BALAZINSKI M, BROCHU M, et al. Material-design-process selection methodology for aircraft structural components: application to additive vs subtractive manufacturing processes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(1/2/3/4): 1509-1517.
- [2] YANG J X, YUEN A. An analytical local corner smoothing algorithm for five-axis CNC machining[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 123: 22-35.
- [3] TUTUNEA-FATAN O R, FENG H Y. Configuration analysis of five-axis machine tools using a generic kinematic model[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(11): 1235-1243.
- [4] ZHANG S Y, HE C, LIU X J, et al. Kinematic chain optimization design based on deformation sensitivity analysis of a five-axis machine tool[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(12): 2375-2389.
- [5] YANG J X, ALTINTAS Y. Generalized kinematics of five-axis serial machines with non-singular tool path generation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 75: 119-132.
- [6] WAN M, LIU Y, XING W J, et al. Singularity avoidance for five-axis machine tools through introducing geometrical constraints[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 127: 1-13.
- [7] SENCER B, ALTINTAS Y, CROFT E. Modeling and control of contouring errors for five-axis machine tools—part I: modeling[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(3): 031006.
- [8] YEH S S, HSU P L. Perfectly matched feedback control and its integrated design for multiaxis motion systems[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2004, 126(3): 547-557.
- [9] TANG T F, FANG H L, ZHANG J. Hierarchical design, laboratory prototype fabrication and machining tests of a novel 5-axis hybrid serial-parallel kinematic machine tool[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 64: 101944.
- [10] WANG D, WANG L P, WU J, et al. An experimental study on the dynamics calibration of a 3-DOF parallel tool head[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(6): 2931-2941.
- [11] Tricept[EB]. [2021-03-28].
- [12] Ecospeed[EB]. [2021-03-28].
- [13] 刘海涛. 少自由度机器人机构一体化建模理论、方法及工程应用[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
LIU H T. Unified parameter modeling of lower mobility robotic manipulators: theory, methodology and application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [14] 于广. 一类五轴混联机床静刚度及铣削稳定性研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.  
YU G. Investigation on stiffness and milling stability of a class of five-axis hybrid machine tool[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [15] 刘海涛, 潘巧, 尹福文, 等. TriMule 混联机器人的精度综合[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(12): 1245-1254.  
LIU H T, PAN Q, YIN F W, et al. Accuracy synthesis of the TriMule hybrid robot[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(12): 1245-1254.
- [16] WU L, DONG C L, WANG G F, et al. An approach to predict lower-order dynamic behaviors of a 5-DOF hybrid robot using a minimum set of generalized coordinates[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 67: 102024.
- [17] XIE F G, LIU X J, LI T M. Type synthesis and typical application of 1T2R-type parallel robotic mechanisms[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 1-12.
- [18] XIE F G, LIU X J, YOU Z, et al. Type synthesis of 2T1R-type parallel kinematic mechanisms and the application in manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, 30(1): 1-10.
- [19] WANG J S, WU C, LIU X J. Performance evaluation of parallel manipulators: Motion/force transmissibility and its index[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(10): 1462-1476.
- [20] WU C, LIU X J, WANG L P, et al. Optimal design of spherical 5R parallel manipulators considering the motion/force transmissibility[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2010, 132(3): 031002.
- [21] LIU X J, XIE Z H, XIE F G, et al. Design and development of a portable machining robot with parallel kinematics[C]//*Proceedings of 2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 133-136.
- [22] XIE Z H, XIE F G, LIU X J, et al. Global G3 continuity toolpath smoothing for a 5-DoF machining robot with parallel kinematics[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 67: 102018.
- [23] XIE Z H, XIE F G, LIU X J, et al. Tracking error prediction informed

motion control of a parallel machine tool for high-performance machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 164: 103714.

[24] MEI B, XIE F G, LIU X J, et al. Elasto-geometrical error modeling and compensation of a five-axis parallel machining robot[J]. Precision Engineering, 2021, 69: 48-61.

[作者简介]



**解增辉**（1993- ），男，清华大学在站博士后，主要研究方向为并联机器人、轨迹规划、动力学控制等。



**毕伟尧**（1992- ），男，清华大学博士生，主要研究方向为并联机器人、参数优化设计等。



**谢福贵**（1982- ），男，博士，清华大学副教授，主要研究方向为机构学与机器人、先进制造技术及装备等。



**梅斌**（1994- ），男，清华大学博士生，主要研究方向为并联机器人、机器人精度保证等。



**刘辛军**（1971- ），男，博士，清华大学教授，主要研究方向为机构学与机器人、先进与智能制造装备等。