

DOI: 10.3901/JME.2020.19.070

# 一种大型复杂构件加工新模式及新装备探讨\*

谢福贵<sup>1,2,3</sup> 梅斌<sup>1,2,3</sup> 刘辛军<sup>1,2,3</sup> 张加波<sup>4</sup> 乐毅<sup>4</sup>

(1. 清华大学机械工程系摩擦学国家重点实验室 北京 100084;

2. 清华大学(机械系)-西门子先进工业机器人联合研究中心 北京 100084;

3. 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;

4. 北京卫星制造厂有限公司 北京 100094)

**摘要:** 大型复杂构件是航空航天、能源、船舶等领域装备的核心结构件, 此类构件通常具有尺寸大、形状复杂、刚性弱等特点。传统“分体离线加工-在线检测”模式存在工艺不稳定、过程复杂、柔性差、周期长等问题, 以龙门式多轴数控机床加工为代表的“包容式”加工模式, 难以适应大型复杂构件的高效高质量加工制造需求。提出一种基于移动式 and 吸附式机器人的多机协同原位加工新模式, 通过多机器人系统自主寻位、精确定位加工与加工质量原位检测, 实现大型复杂构件多安装面并行铣削、制孔与打磨等作业。多机器人系统包括移动式混联机器人、吸附式并联机器人、移动式串联铣削机器人、移动式双臂加工机器人和移动式打磨机器人。构建多机协同原位加工模式, 需要揭示多机器人协同原位加工行为与大型弱刚性结构件质量控制的交互机理, 面临着本体、测量、工艺和集成四个方面的挑战, 需要设计高灵活、高刚度的移动式 and 吸附式加工机器人, 解决移动机器人自主准确寻位和超大结构件原位高精检测难题, 攻克加工变形误差在线补偿和振动抑制技术, 通过集成实现多机协同高效高精加工, 为大型复杂构件的高效高质量制造提供创新技术及装备, 并实现此类构件制造核心技术及装备自主可控。

**关键词:** 大型复杂构件; 多机协同原位加工; 移动式混联机器人; 吸附式并联机器人

**中图分类号:** TG156

## Novel Mode and Equipment for Machining Large Complex Components

XIE Fugui<sup>1,2,3</sup> MEI Bin<sup>1,2,3</sup> LIU Xinjun<sup>1,2,3</sup> ZHANG Jiabo<sup>4</sup> YUE Yi<sup>4</sup>

(1. The State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering (DME), Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Tsinghua University (DME)-Siemens Joint Research Center for Advanced Robotics, Beijing 100084;

3. Beijing Key Lab of Precision/Ultra-precision Manufacturing Equipments and Control, Beijing 100084;

4. Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract:** Large complex components are the core parts of equipment in the fields of aerospace, energy, ship, etc. Such components have common features such as large size, complex shape and weak stiffness. The traditional mode of offline processing and online detection has problems such as unstable and complicated process, poor flexibility and long cycle. The inclusive mode represented by gantry multi-axis CNC machine tool can hardly adapt to the requirements of high efficient and quality machining for large complex components. A novel multi-machine cooperative in-situ machining mode based on mobile and adsorptive robots is proposed. The multi-robot system can complete the independent locating, precise positioning and machining, and in-situ detection of machining quality, realizing simultaneously milling, drilling and polishing for multiple mounting surfaces. The multi-robot system includes a mobile hybrid robot, an adsorptive parallel robot, a mobile serial milling robot, a mobile dual-arm machining robot and a mobile grinding robot. In order to build the multi-machine cooperative in-situ processing mode, the interaction mechanism between multi-robots and large thin parts need to be revealed. And the challenges of design, measurement, craft and integration are encountered. It is necessary to design highly flexible mobile and adsorptive robots with high stiffness, solve the problems of accurate

\* 国家重点研发计划(2018YFB1306800)、国家自然科学基金(51922057, 91748205)和北京市科技计划(Z181100003118003)资助项目。20191230 收到初稿, 20200420 收到修改稿

autonomous positioning and in-situ measurement, and conquer the deformation error online compensation and vibration suppression technology. Through system integration, multi-machine cooperative machining with high-efficiency and high-precision can be achieved, providing innovative technology and equipment for manufacturing large complex components. Consequently, the core technology and equipment of manufacturing such components can be controlled independently.

**Key words:** large and complex components; multi-machine cooperative in-situ machining; mobile hybrid robot; adsorptive parallel robots

## 0 前言

空间站航天器舱体、航空薄壁件、重型燃气轮机构架、船用螺旋桨等大型复杂构件，是航空航天、能源、船舶等领域装备的核心结构件，在相关行业中有着广泛应用。此类构件通常具有尺寸大、形状复杂、位置精度和表面质量要求高并伴有薄壁结构等共性特征。大型复杂构件的设计、制造、测量等关键技术是制造业重点发展领域的优先主题。当前，对航空航天领域大尺寸铝合金和复合材料结构件的高效加工，卫星、空间站等航天器总装配体整体化加工能力的需求愈加旺盛，研究的重要性日渐凸显。

根据国务院 2016 年印发的《“十三五”国家科技创新规划》要求，我国要在 2030 年，综合空间技术跻身世界航天强国。未来将在载人航天与探月工程、深空探测及空间飞行器在轨服务与维护、天地一体化信息网络等国家重大专项规划的框架下，开展对大型、轻质(薄壁)、复杂多功能航天器结构的研制。大型航天器一般由多个铝合金舱体类构件组成，此类构件具有尺寸大、刚性弱、结构复杂等特点，加工中易变形、精度难以保证。以空间站核心舱为例，其直径达到 4.5 m，单个舱段长达 9 m，整体壁板最薄 2 mm，且舱体上有 1 000 多个具有相关性的安装面需要加工，精度要求高。此类大型舱体构件尺寸已大大超出有机床的加工行程，而开发大型专用加工装备，成本极高且利用率低，造成资源浪费以及生产成本的剧增。

针对此类大型舱体类构件的制造难题，目前的解决方案是：采用小型多轴数控机床离线分体切削加工，运送至装配车间开展组装，采用跟踪仪进行在线检测和测量调试。该方案工序多，至少需要经历 1 次初次安装、测量，拆卸、运送，装夹、钻铣加工，转运、复位安装，测量、调整的过程，质量稳定性不好保证，生产效率极低，1 个小柱段需要 4 至 6 个月的生产周期，同时，工艺不稳定也制约了加工精度的提高，严重影响航天生产任务进度。

针对这种情况，大型航天结构件、大型航天器舱体的多安装面整体结构一体化加工、检测已成为

必然的选择。与此同时，以龙门式多轴数控机床加工为代表的“包容式”加工模式，难以适应大型舱体类构件的高效高质量加工制造需求，急需变革性技术及装备解决大型构件的高效制造难题。

## 1 制造模式及装备发展趋势

### 1.1 移动式加工装备

从国内外发展现状看，机器人技术的应用，革新了很多行业的生产模式<sup>[1-5]</sup>。近些年来，串联移动式加工机器人在大型零部件的生产加工中得到应用，如：图 1a 所示的采用 AGV 车实现移动功能的 KUKA 机器人叶片磨抛系统<sup>[6]</sup>，以及图 1b 所示的由华中科技大学丁汉院士团队在国内首次建立的大型叶片磨抛系统<sup>[7]</sup>，其采用直线轨道实现移动功能。移动加工方式的出现，克服了传统龙门机床的不足，拓展了工作空间，降低了成本，提高了效率，也使得整个生产系统具备柔性<sup>[8-12]</sup>，形式灵活、多样化，不但可以适应不同的加工对象，也可如图 1b 一样，进一步构建多机协同加工系统。



(a) KUKA 机器人磨抛系统

(b) 华中科技大学机器人磨抛系统

图 1 移动式机器人叶片磨抛

虽然以串联机械臂为加工单元的移动式加工机器人成为加工大型构件的新选择，在实际应用中却面临着很多限制。串联机械臂刚度差，不能承受重载、交变载荷，所以此类“移动平台+串联机械臂+末端操作器”的移动机器人系统往往多应用于磨抛、喷涂、焊接、抓取等非接触或小接触力的工况。另一方面，机器人精度低(绝对精度仅为 0.3 mm，是机床的 1/30)、本体刚度低(仅为 1 N/ $\mu\text{m}$ ，是机床的 1/50)且变化范围大，在机器人两臂之间夹角过大或者过小时，机构性能急速下降，能实际应用的工作空间有限<sup>[13-16]</sup>。

加工装备的发展总是伴随着机构原理构型的不

断创新,继龙门机床、串联移动加工机器人之后,以并/混联机器人<sup>[17-20]</sup>为加工核心的移动式加工机器人成为了复杂构件制造装备的一个发展趋势。并/混联机器人被誉为近20年来最具创新性的工程设计,与串联机器人相比,具有结构紧凑、重量轻、刚度好、动态特性好等优点<sup>[21-24]</sup>。结构紧凑和重量轻带来的便携特性意味着其便于现场运输和具有可重组、高动态响应、低移动质量的特点,有助于提高定位精度和加工效率。并联机器人能够实现多轴运动、精度高、重量轻,容易实现模块化,并且刚度大,能承受大负载,可以作为移动式加工装备切削执行单元<sup>[25-27]</sup>。并联机器人在加工装备中的应用,弥补了传统龙门机床在响应速度、加速度和刚度质量比方面的劣势,与串联加工机器人相比,在刚度、加工效率方面具有明显优势。

自20世纪90年代中期首台并联机器人问世以来,瑞典、美国、德国、中国等国家的几十家企业与研究机构在并/混联加工机器人化装备及其结构设计方面做了大量研发工作,有些产品已在工业界得到了成功应用,其中包括在业界比较有影响力的西班牙 Pkmtricept SL 公司生产的 Tricept 系列加工装备(开发 Tricept 的原瑞典 Neos Robotics AB 公司的一部分被西班牙 Pkmtricept SL 收购),图2所示即是基于 Tricept 五自由度混联装备<sup>[28]</sup>的移动式加工中心。Tricept 的并联模块可以实现多轴运动,具有质量小(580 kg)、精度高(0.02 mm)的特点,同时,激光定位装置实现了在加工过程中的定位检测,满足了高速、高刚度和高精度等加工要求,使得装备整机的综合性能更优。



图2 基于并联机器人的移动式加工中心

Tricept 的并联模块提供三个自由度的空间定位运动,需要在末端附加两自由度串联摆头实现 A/C 摆动。然而, A/C 关节摆头有其局限性:首先, A/C 关节摆头在刀具转动过象限时,已加工表面有时会被高速旋转的刀具刮伤;同时,串联 A/C 摆角头是

通过合成运动来实现二自由度转动,响应速度慢,不利于加工速度的进一步提高。

为了克服这种传统的摆叉式主轴头结构的局限性,德国 DS-Technologie 公司按照飞机结构件加工工艺的特点,独创性地推出了 Ecospeed 混联加工中心<sup>[29]</sup>,其中采用了如图3所示的 Sprint Z3 型主轴头,其独特的结构使安装在运动平台上的电主轴可向任何方向作 40°偏转,实现了 A/B 轴主轴头的耦合运动功能,且其偏转定位速度可达 80 %s,加速度可达 685 %s<sup>2</sup>。区别于串联 A/C 摆头用运动合成的方式实现二自由度转动, Z3 摆角头的转动是由姿态耦合运动的方式实现的。除了避免刮伤外,耦合运动实现姿态调整的摆角头效率更高。中航工业成飞公司的生产实践表明,一个典型飞机结构件,采用传统五轴联动加工中心需要 9 h,采用基于 Z3 的混联加工中心只需 2 h,且无需二次打磨。然而,并联 Z3 摆角头同样是三自由度机构,不能实现五轴联动,其余自由度是以串联导轨的形式补充的,这使得以并联 Z3 摆角头为核心的 Ecospeed 混联加工中心重量大,难以实现轻量化移动式加工的功能。



图3 Sprint Z3 主轴头

图4所示的设备是由德国 Metrom 公司开发的具有全并联结构且能实现五轴联动加工的机器人,可以实现移动式加工和姿态耦合运动,兼具轻量化的特点<sup>[30]</sup>,为移动式加工机器人的末端单元设计提供了新思路。国内在此类装备的研发上仍处于空白状态。另外,针对大型复杂构件的移动式加工应用, Metrom 公司的产品在构型设计、系统构建上仍存在不足。



图4 Metrom 加工机器人

综合考虑,融合移动式加工概念、并联机构耦



合调姿高效定向特点、五自由度并联机构轻量化理念，基于实现姿态耦合运动的空间五自由度全并联机构的移动式加工机器人将是实现大型复杂构件高效高质量加工的理想选择。

## 1.2 多机器人原位协同加工制造模式

相比于单机器人制造单元，多机器人系统配置灵活<sup>[31]</sup>，可根据加工对象进行重构，而且多机器人系统在时间和空间分布上更具优越性，检测传感信息可有效互补、自适应实现多种加工需求、基于先进的协作架构和协同策略完成复杂加工任务<sup>[32]</sup>。例如，KUKA 为波音公司研制了一套飞机蒙皮多机器人装配系统<sup>[33]</sup>(图 5)；卡内基梅隆大学、CTC 公司和美国空军研究实验室联合开发的多机器人军机表面涂层激光剥离系统<sup>[34]</sup>(图 6)；南京航空航天大学为航空工业洪都研制的双机器人协同钻铆系统<sup>[35]</sup>；以及如图 1b 所示的由华中科技大学研制的多机器人磨抛系统。这种工件保持位置不动，多机器人移动协同的作业方式，增加了柔性，提高了效率。以上生产实践证明，多机器人原位协同加工是解决大型结构件高效、高质量制造的有效途径。

综上所述，大型复杂构件制造模式正在由超大设备在位“包容式”加工向“小机床加工大工件”的移动式小型单元原位制造模式转变，由单机器人制造向“蚂蚁噬骨”式多机器人原位协同加工转变。



图 5 Boeing-KUKA 飞机蒙皮制孔系统



图 6 CMU-CTC 涂层剥离系统

## 2 大型复杂构件制造新模式及新装备构思

随着我国航空航天、能源、船舶等领域的事业不断深入和突破，在从“大”到“强”逐渐转变的过程中，对装备核心部件(一般为大型复杂构件)的加工需求愈加旺盛和严苛。以航天事业为例，从神舟飞船到空间实验室、货运飞船，从空间站到载人探月与深空探测，任务难度不断提升，为适应极端空间环境和实现可靠性服役，航天器的尺寸不断增大、性能要求持续提升，从而对作为核心部件的大型复杂构件的加工要求也在不断提高。大型复杂构件的尺寸更大、结构更加复杂，待加工面数量大、种类多，如：位置精度要求高的安装面、位置精度要求较低一些的安装面、粗糙度要求高的安装面、悬臂梁结构的弱刚性安装面、位于构件顶部的安装面等。大型复杂构件尺寸已大大超出了现有机床的工作行程，其高效高精制造是亟待解决的难题，目前采用的“分体离线加工-在线检测”模式，存在工艺不稳定、过程复杂、柔性差、周期长等问题，难以实现高效制造，并且工艺不稳定也会制约制造精度的进一步提升，严重影响生产任务的进度和质量。串联移动式加工机器人虽然可以实现移动式柔性加工，并通过构建多机器人协同加工系统进一步提高作业效率，但是串联机械臂刚度差、精度低，仅使用串联移动式加工机器人无法满足大型复杂构件上高精安装面的加工需求。

针对大型复杂构件尺寸大、刚性弱、结构复杂的特点，融合移动式加工概念、并联机构耦合调姿高效定向特点、五自由度并联机构轻量化理念和多机器人协同加工作业方式，提出一种变革性制造模式——基于移动式和吸附式机器人的多机协同原位加工模式(图 7)，使用多机器人系统完成自主准确寻位、精确定位与加工作业、加工质量原位检测，实现大型复杂构件的多安装面并行铣削、制孔与打磨等加工。

多机器人系统包括移动式混联机器人、移动式串联铣削机器人、移动式双臂加工机器人、移动式打磨机器人和吸附式并联机器人。

装备的精度会直接影响其作业性能，大型复杂构件的高精安装面对形位公差和表面精度要求严格，串联机械臂的精度和刚度难以胜任这类安装面的加工任务。针对此类高精安装面的加工需求，提出了基于“全向移动平台+高刚度机械臂+轻量化五

轴加工功能部件”的移动式混联机器人(图8)。全向移动平台实现大范围自主寻位,高刚度机械臂实现准确定位,轻量化五轴加工功能部件实现高精加工。



图7 多机协同原位加工新模式

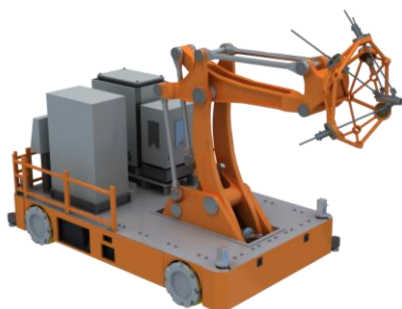


图8 移动式混联机器人

全向移动平台由四个麦克纳姆轮驱动,实现灵活的全向运动。在全向移动平台的底部有三个电动机驱动的稳定支撑装置,在车体运动时稳定支撑装置收缩,在车体到达加工作业位置时,稳定支撑装置落下,如图9所示,实现三点定位支撑,保证加工过程中车体的稳定性。在全向移动平台上配备有定位系统(如 iGPS),实现移动式混联机器人在大场景下的定位和自主导航。



图9 全向移动平台稳定支撑装置

高刚度机械臂为二自由度机构,如图10所示,通过平行四边形机构的设计,保证在运动过程中末端实现姿态不变的二自由度平动。全向移动平台到达工作位置并稳定支撑后,高刚度机械臂将五轴加工功能部件定位到大型复杂构件的待加工面附近,并保证待加工面处于五轴加工功能部件的工作空间内。在五轴加工功能部件开展加工作业时,高刚度机械臂的驱动锁定,与落下稳定支撑装置的全向移动平台一起构成轻量化五轴加工功能部件的基座。

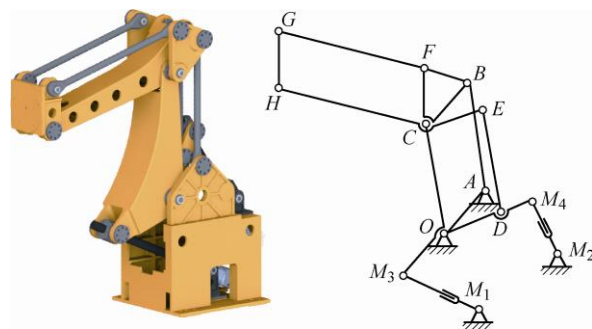


图10 高刚度机械臂

轻量化五轴加工功能部件是五自由度并联机构,如图11所示,具有四条六自由度支链和一条五自由度支链,在每条支链上由中空电动机连接螺母,驱动丝杠伸长和缩短,从而控制末端的运动。轻量化五轴加工功能部件的末端可以实现三维平动和二维转动,具有大工作空间、高转动输出特性和高运动精度,可以实现高精五轴加工。在轻量化五轴加工功能部件上配备有视觉引导系统、切削力实时监测系统 and 三维面型精密测量系统。视觉引导系统用于确定刀具与工件之间的位姿关系,建立加工基准。切削力实时监测系统用于检测加工过程中的切削力/力矩,为加工变形误差在线补偿提供基础。三维面型精密测量系统用于对加工后的表面质量进行原位检测,保证加工效果符合要求。

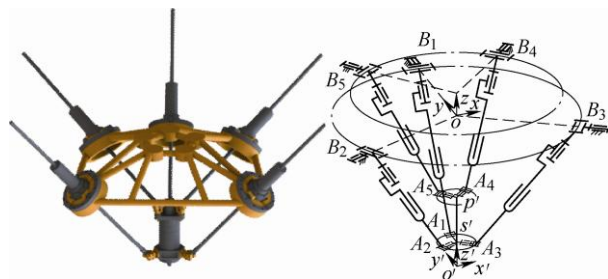


图11 轻量化五轴加工功能部件

移动式混联机器人的工作模式详细说明如下:使用 iGPS 等定位系统建立移动式混联机器人和大型复杂构件的位置关系,全向移动平台自主导航寻位到作业地点,然后全向移动平台的稳定支撑装置



落下,实现三点定位支撑。高刚度机械臂将轻量化五轴加工功能部件定位到待加工面,然后锁定高刚度机械臂的驱动电动机。使用视觉引导系统建立工件坐标系与轻量化五轴加工功能部件本体坐标系间的位姿关系,完成在轻量化五轴加工功能部件本体坐标系下找正工件,在此基础上开展五轴加工。在加工过程中,使用切削力实时监测系统检测切削力,根据工艺系统加工变形模型分析变形误差,开展在线补偿,保证加工精度。在加工后,使用三维面型精密测量系统检测加工面,对加工效果进行质量评估,保证加工完成后的表面符合精度要求。

移动式串联铣削机器人的结构形式是“全向移动平台+六自由度串联机械臂+高精度铣削末端执行器”,如图 12 所示。移动式串联铣削机器人在寻位到作业地点后,使用视觉引导系统开展测量,根据待加工安装面的位姿调整高精度铣削末端执行器的位置和姿态,然后六自由度串联机械臂固定关节,铣削末端执行器开展加工。移动式串联铣削机器人用于加工精度要求较低一些的安装面。



图 12 移动式串联铣削机器人

移动式双臂加工机器人如图 13 所示,在全向移动平台上安装有两台六自由度串联机械臂,其中一台机械臂的末端安装辅助夹持装置,另一台机械臂的末端安装加工装置。移动式双臂加工机器人用于加工基于悬臂梁结构的弱刚性安装面,加工过程中用一台机械臂夹紧工件,避免加工过程中工件振颤导致加工超差,然后用另一台机械臂完成铣削或钻孔加工。



图 13 移动式双臂加工机器人

移动式打磨机器人如图 14 所示,结构形式是“全向移动平台+六自由度串联机械臂+磨抛装置”。在使用 iGPS 等定位系统寻位到大型复杂工件的作业地点后,移动式打磨机器人使用视觉引导系统将磨抛装置精确定位到待磨抛安装面,并引导磨抛装置开展加工作业。移动式打磨机器人用于打磨和抛光工件,加工对粗糙度要求较高的安装面。



图 14 移动式打磨机器人

以上四种移动式机器人能够针对不同精度要求和结构特点的安装面完成加工作业。然而,对于大型复杂构件顶部等位置的安装面,采用移动式机器人无法加工到这些部位。针对这类安装面的加工需求,提出基于“高效吸附机构+轻量化五轴加工功能部件”的吸附式并联机器人(图 15)。使用高效吸附机构实现在大型复杂构件表面的吸附,进而在视觉系统引导下使用轻量化五轴加工功能部件加工安装面。



图 15 吸附式并联机器人

多机器人系统对大型复杂构件开展原位协同加工,需要根据被加工特征的结构特点和精度要求,以安全、高效、高精为指标,优化多机器人站位布局、任务规划及加工次序。采用移动式混联机器人加工精度要求高的加工面;采用吸附式并联机器人加工大型复杂构件顶部的低矮加工面;采用移动式双臂加工机器人加工基于悬臂梁结构的弱刚性加工面;采用移动式串联铣削机器人加工精度要求低的安装面;采用移动式打磨机器人加工表面粗糙度要求高、需要磨抛的加工面。在加工过程中实时监测

切削力信息, 结合工艺系统的刚度模型分析外力作用下的弹性变形, 对变形误差开展在线补偿, 并根据多机器人装备与大型弱刚性构件交互作用的系统动力学模型, 优化控制参数, 抑制多源激励下的加工振动, 保证加工精度。

基于移动式 and 吸附式机器人的多机协同原位加工模式能够适应大型复杂构件尺寸大、刚性弱及特征复杂的发展趋势, 克服传统“分体离线加工-在线检测”模式存在的工艺不稳定、过程复杂、柔性差、周期长等不足, 实现多机器人的灵活布置和协同作业, 按照工艺流程进行柔性加工, 并通过加工质量原位检测保证加工效果, 有效提高大型复杂构件的制造效率, 缩短生产周期。

### 3 可能的科学问题与技术挑战

基于移动式 and 吸附式机器人的多机协同原位加工新模式及新装备, 可以实现对大型复杂构件的原位柔性加工, 但是大型复杂构件尺寸大、特征复杂、刚性弱和精度要求高的特点导致实现其高效高精制造仍面临诸多挑战。

大型复杂构件部分安装面的形位公差要求严格, 需要高性能机器人装备进行加工, 但是不同构型和尺寸参数的机器人性能差异极大, 设计满足要求的高灵活、高刚度机器人装备是首要关键; 大型复杂构件的尺寸大, 如空间站核心舱的直径达到 4.5 m, 单个舱段长达 9 m, 随着测量空间增大, 测量精度会不断下降, 移动机器人在大工作场景中进行自主准确寻位难度大、干扰多; 大型复杂构件具有薄壁结构弱刚性特征, 在加工过程中受切削力作用极易产生变形, 导致加工超差, 而加工变形受工艺参数、机器人刚度、大型复杂构件刚度等诸多因素的耦合作用和影响, 多移动机器人高精度原位加工工艺优化及加工变形控制是保证加工质量的关键; 大型复杂构件的弱刚性同时会导致加工过程中的振动, 影响加工精度, 在多机器人协同加工多振源激励下, 大型复杂构件的振动情况极其复杂, 多移动机器人协同加工及主动抑振控制面临巨大挑战。

因此, 为了使多机器人协同原位加工系统达到性能要求, 实现大型复杂构件的高效高精制造, 需要解决的科学问题是: 多机器人协同原位加工行为与大型弱刚性结构件质量控制的交互机理, 面临本体、测量、工艺和集成四个方面的技术挑战。

(1) 移动式高效加工机器人系统设计: 装备的性能是影响加工高效性的关键因素, 难点是移动式/

吸附式加工机器人的高灵活、高刚度设计。需要根据加工需求对机器人装备进行构型设计, 研究机器人装备的运动/力传递和约束特性, 基于性能评价指标开展尺度综合, 设计出具有大工作空间、高转动输出特性的机器人机构。

(2) 加工机器人精确自寻位: 测量系统的高精度是保证加工效果的基础, 难点是移动机器人自主准确寻位。需要研究大场景和复杂工序下多移动机器人的精确定位和自主导航技术, 规划多移动机器人运动路径; 研究双目视觉高精检测技术, 使用视觉引导装置建立机器人坐标系与工件坐标系的精确位姿关系, 在此基础上开展加工作业, 保证加工面相对于构件整体坐标系的精度。

(3) 大型构件多机加工工艺设计与优化: 加工工艺的设计和优化是降低加工变形误差的有效手段, 难点是多移动机器人高精度原位加工工艺及加工变形控制。需要研究基于待加工面结构特点的多机器人并行加工工艺设计方法, 提出高效安全的多移动机器人作业策略。研究加工机器人和弱刚性构件的刚度建模方法, 建立工艺系统加工变形模型, 使用切削力实时监测系统检测加工过程中的切削力/力矩, 根据刚度模型分析加工变形, 开展变形误差在线补偿, 保证加工精度。

(4) 多移动机器人协同加工集成与应用: 多机器人与弱刚性大型复杂构件的交互作用是影响加工精度的重要因素, 难点是多移动机器人协同加工及主动抑振。需要研究多机器人协同控制体系架构, 构建多机器人装备与大型弱刚性构件交互作用的系统动力学模型, 研究系统参数辨识方法, 分析系统频响特性, 通过优化控制参数抑制加工振动。

### 4 结论

针对大型复杂构件尺寸大、刚性弱、结构复杂的特点, 融合移动式加工概念、并联机构姿态耦合运动高效定向特点、五自由度并联机构轻量化理念和多机器人协同加工作业方式, 提出一种变革性制造模式——基于移动式 and 吸附式机器人的多机协同原位加工模式。使用多机系统完成自主寻位、精确定位与加工质量原位检测, 实现大型复杂构件的多安装面并行铣削、制孔与打磨等加工作业。针对大型复杂构件上不同精度要求和结构特点的安装面的加工需求, 研制两类新型制造装备——移动式混联机器人和吸附式并联机器人, 与移动式串联铣削机器人、移动式双臂加工机器人、移动式打磨机器人共同完成大型复杂构件的原位协同加工。

基于移动式 and 吸附式机器人的多机协同原位加工模式的应用需要深入研究多机器人协同原位加工行为与大型弱刚性结构件质量控制的交互机理, 攻克机器人高刚度与高效能设计、精准自主寻位、柔性原位加工工艺、多机协同控制及主动抑制等关键技术难题, 为大型复杂构件的高效高质量制造提供创新技术及装备, 用自主创新的机器人装备及多机协作制造工艺加工此类大型复杂构件, 从而自主制造出大型航天器等国家战略装备, 实现大型结构件制造核心技术及装备自主可控。

### 参 考 文 献

- [1] GARNIER S, SUBRIN K, AREVALO-SILES P, et al. Mobile robot stability for complex tasks in naval industries[J]. *Procedia CIRP*, 2018(1), 72: 297-302.
- [2] AHMED K, DU T T, ZHANG Y. A practical approach for automated polishing system of free-form surface path generation based on industrial arm robot[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(1): 1-14.
- [3] KIM S H, NAME E, HA T I, et al. Robotic machining: A review of recent progress[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(9): 1629-1642.
- [4] AXINTE D A, ALLEN J M, ANDERSON R, et al. Free-leg Hexapod: A novel approach of using parallel kinematic platforms for developing miniature machine tools for special purpose operations[J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 395-398.
- [5] VERL A, VALENTE A, MELKOTE S, et al. Robots in machining[J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(2): 799-822.
- [6] KUKA. Mobile robot[EB/OL]. [2019-10-23]. <https://www.kuka.com/en-cn/products/mobility/mobile-robot-systems/kmr-quantec>.
- [7] 丰飞, 严思杰, 丁汉. 大型风电叶片多机器人协同磨抛系统的设计与研究[J]. *机器人技术与应用*, 2018(5): 16-24.  
FENG Fei, YAN Sijie, DING Han. Design and research of multi-robot cooperative grinding and polishing system for large wind power blades[J]. *Robot Technique and Application*, 2018(5): 16-24.
- [8] RUSHWORTH A, AXINTE D A, RAFFLES M, et al. A concept for actuating and controlling a leg of a novel walking parallel kinematic machine tool[J]. *Mechatronics*, 2016: 63-77.
- [9] OLARRA A, AXINTE D A, KORTABERRIA G, et al. Geometrical calibration and uncertainty estimation methodology for a novel self-propelled miniature robotic machine tool[J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2018(1): 204-214.
- [10] MOLLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, et al. Machining of large scaled CFRP-parts with mobile CNC-based robotic system in aerospace industry[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017(1): 17-29.
- [11] SUSEMIHL H, MOELLER C, KOTHE S, et al. High accuracy mobile robotic system for machining of large aircraft components[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2016, 9(2): 231-238.
- [12] TUNC L T, SHAW J. Experimental study on investigation of dynamics of hexapod robot for mobile machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015(1): 817-830.
- [13] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 236-245.
- [14] LIGHTCAP C, HAMNER S, SCHMITZ T L, et al. Improved positioning accuracy of the pa10-6ce robot with geometric and flexibility calibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(2): 452-456.
- [15] LI Jie, XIE Fugui, LIU Xinjun, et al. Geometric error identification and compensation of linear axes based on a novel 13-line method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016: 2269-2283.
- [16] BU Y, LIAO W, TIAN W, et al. Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application[J]. *Precision Engineering*, 2017(1): 388-400.
- [17] LIU Xinjun, LI Jie, ZHOU Yanhua. Kinematic optimal design of a 2-degree-of-freedom 3-parallelogram planar parallel manipulator[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 87: 1-17.
- [18] XIE Fugui, LIU Xinjun, WANG Jinsong, et al. A 3-DOF parallel manufacturing module and its kinematic optimization[J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2012, 28(3): 334-343.
- [19] 叶伟, 杨臻, 李秦川. 一种远中心并联机构运动学与性能分析[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(5): 65-73.  
YE Wei, YANG Zhen, LI Qinchuan. Kinematics and performance analysis of a parallel manipulator with remote center of motion[J]. *Journal of Mechanical*



- Engineering, 2019, 55(5): 65-73.
- [20] MENG Qizhi, XIE Fugui, LIU Xinjun. Conceptual design and kinematic analysis of a novel parallel robot for high-speed pick-and-place operations[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, 13(2): 211-224.
- [21] MERLET J P. *Parallel robots*[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2006.
- [22] LIU Xinjun, WANG Jinsong. *Parallel kinematics: type, kinematics, and optimal design*[M]. New York: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2014.
- [23] WANG Jinsong, WU Chao, LIU Xinjun. Performance evaluation of parallel manipulators: Motion/force transmissibility and its index[J]. *Mechanism Machine Theory*, 2010, 45(10): 1462-1476.
- [24] HUANG Tian, LIU Haitao, CHETWYND D G, et al. Generalized Jacobian analysis of lower mobility manipulators[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, 46(6): 831-844.
- [25] OLARRA A, ALLEN J, AXINTE D A, et al. Experimental evaluation of a special purpose miniature machine tool with parallel kinematics architecture: Free leg hexapod[J]. *Precision Engineering-journal of The International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2014, 38(3): 589-604.
- [26] XIE Fugui, LIU Xinjun, LUO Xuan, et al. Mobility, singularity, and kinematics analysis of a novel spatial parallel mechanism[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2016, 8(6): 061022.
- [27] XIE Fugui, LIU Xinjun, WANG Jinsong, et al. Kinematic optimization of a five degrees-of-freedom spatial parallel mechanism with large orientational workspace[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2017, 9(5): 051005.
- [28] Pkmtricept S L. Tricept[EB/OL]. [2019-10-23]. <http://pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nfamilia=1238064354>.
- [29] Starrag. Ecospeed[EB/OL]. [2019-10-23]. <https://www.starrag.com/en-us/product-range/11>.
- [30] Metrom[EB/OL]. [2019-10-23]. <http://www.metrom-mobil.com/>.
- [31] 高峰. 机构学研究现状与发展趋势的思考[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(8): 3-17.
- GAO Feng. Reflection on the current status and development strategy of mechanism research[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(8): 3-17.
- [32] 关英姿, 刘文旭, 焉宁, 等. 空间多机器人协同运动规划研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(12): 37-43.
- GUAN Yingzi, LIU Wenxu, YAN Ning, et al. Research on cooperative motion planning of space multi-robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(12): 37-43.
- [33] KUKA. Automation in the aerospace industry[EB/OL]. [2019-10-23]. <https://www.kuka.com/en-cn/industries/weitere-branchen/aerospace>.
- [34] CMU. Laser Coating Removal for Aircraft[EB/OL]. [2019-10-23]. <https://www.nrec.ri.cmu.edu/nrec/solutions/defense/laser-coating-removal-for-aircraft.html>.
- [35] 向勇, 田威, 洪鹏, 等. 双机器人钻铆系统协同控制与基坐标系标定技术[J]. *航空制造技术*, 2016(16): 87-92.
- XIANG Yong, TIAN Wei, HONG Peng, et al. Collaborative control and base coordinates calibration technology for dual-robot drilling and riveting system[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(16): 87-92.

作者简介: 谢福贵, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 德国“洪堡”学者, 国家优秀青年科学基金获得者。主要研究方向为机构学与机器人、先进制造装备。

E-mail: xiefg@mail.tsinghua.edu.cn

刘辛军(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 教育部“长江学者”特聘教授, 国家“万人计划”领军人才。主要研究方向为机构学与机器人、先进制造装备。

E-mail: xinjunliu@mail.tsinghua.edu.cn