

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.001

## 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述

田 威, 焦嘉琛, 李 波, 崔光裕

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:** 新一代航空航天产品的研制与批产对制造精度与加工质量提出了更高的新要求。以机器人为核心的智能制造技术与装备是解决该难题的有效途径。然而, 工业机器人较低的定位精度与弱刚性结构属性严重制约了其在航空航天部件高精度加工作业中的推广应用。本文在阐述国内外机器人装备在航空航天制造业的应用现状的基础上, 重点介绍了机器人作业刚度强化策略与定位误差精确补偿方法的研究现状, 并分析了现有高精度控制方法存在的问题及技术难点。最后探讨了机器人作业装备在航空航天制造领域的技术发展趋势, 为面向航空航天产品的机器人高精度制造技术的研究提供参考与借鉴。

**关键词:** 工业机器人; 精度补偿; 刚度强化; 作业装备

中图分类号: TP249 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2020)03-0341-12

## High Precision Robot Operation Equipment and Technology in Aerospace Manufacturing

TIAN Wei, JIAO Jiachen, LI Bo, CUI Guangyu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The development and batch production of new generation aerospace products put forward higher requirements for manufacturing accuracy and processing quality. Intelligent manufacturing technology and equipment with industrial robot as the core is an effective way to solve the problem. However, the low positional accuracy and weak rigid structural properties of industrial robots seriously restrict their popularization and application in high-precision machining of aerospace components. Based on the global application status of robotic equipment in the aerospace manufacturing industry, this paper focuses on the research status of robotic stiffness enhancement strategies and precise compensation methods of positioning error, and analyzes the existing problems and technical difficulties of high-precision control methods. Finally, technology development trend of robot operation equipment in aerospace manufacturing is discussed, which provides reference for the research of robot high-precision manufacturing technology for aerospace products.

**Key words:** industrial robot; precision compensation; stiffness enhancement; operation equipment

**基金项目:** 国家自然科学基金(51875287)资助项目; 江苏省自然科学基金(BK20190417)资助项目; 国家重点研发计划智能机器人专项(2018YFB1306800, 2019YFB1310101)资助项目; 国家科技重大专项(2018ZX04014001, 2018ZX04006001)资助项目; 国防基础科研项目(JCKY2018605C002)资助项目; 装备预先研究项目(61409230105)资助项目。

**收稿日期:** 2020-03-28; **修订日期:** 2020-04-11

**作者简介:** 田威, 男, 教授, 博士生导师, 中国航空学会会员, 中国机械工程学会高级会员。研究方向: 飞机数字化柔性装配技术与装备。主持多项国家自然科学基金、国家科技重大专项等重大科研项目, 荣获省部级科技进步奖 3 项。在国内外核心期刊上发表科技论文 60 余篇。

**通信作者:** 田威, E-mail: tw\_nj@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 田威, 焦嘉琛, 李波, 等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 341-352. TIAN Wei, JIAO Jiachen, LI Bo, et al. High precision robot operation equipment and technology in aerospace manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 341-352.

随着“工业4.0”以及“中国制造2025”的提出,中国将智能制造作为国家重要研究方向,不断强化工业基础能力,优化资源动态配置,推动信息技术与制造技术的深度融合,促进制造业先进技术与装备的创新发展,以实现制造大国向制造强国的革命性跨越<sup>[1]</sup>。工业机器人作为智能制造的核心装备,凭借任务柔性高、人机交互与协同能力强、空间要求低、制造与维护成本低等显著优势,近年来得到了制造业的广泛青睐<sup>[2]</sup>。

以大飞机、高性能军机和大运载火箭为代表的新一代航空航天产品,具有部件结构复杂、开敞性差、材料体系多和装配工艺难的特点,对装配精度与质量提出了更高的新要求,再加上研制转批产周期大幅度缩短,现有人工为主、传统加工机床为辅的作业模式难以满足型号多变、研制周期短和装配精度高的综合要求<sup>[3]</sup>。以工业机器人为核心的智能装配技术与装备是解决该难题的有效新途径,但机器人由于自身结构属性导致绝对定位精度较低、结构刚度较弱,严重影响其应用于航空航天部件的高精度作业,同时该领域还长期受到欧美发达国家的技术垄断。因此,亟需突破机器人高精度作业关键技术并研制具有自主知识产权的机器人智能装配装备,为新一代航空航天产品的研制与批产提供技术与装备保障。

影响机器人作业精度的主要误差源包括机器人的运动误差及载荷引起的误差,本文将分别从作业刚度强化与误差补偿的角度开展原理与主要方法的介绍,指导不同作业环境、不同作业类型的机器人作业装备实现作业任务的精确控制,同时指出机器人作业装备在航空航天制造领域的技术发展方向。

## 1 基于工业机器人的高精度作业系统应用现状

目前,在欧美发达国家,工业机器人已经较为广泛地集成应用于航空、航天等高附加值产品的研制和批产。美国 Electroimpact 公司为波音公司研制了一套用于 F/A-18E/F 战斗机襟翼装配的机器人自动制孔系统(One-sided cell end effector robotic drilling system, ONCE)(图1),该系统已被成功制孔和铆接,通过空间定位精度补偿技术使得核对定位精度达到 $\pm 0.5\text{ mm}$ <sup>[4]</sup>。德国 BROETJE 公司研制了一套机器人装配系统(Robot assembly cell, RACe),用于欧洲直升机公司飞机舱门自动制孔(图2),该系统通过机器人标定后作业精度可达 $\pm 0.3\text{ mm}$ 。德国的弗劳恩霍夫协会研发的移动铣削机器人装备通过集成双目视觉伺服控制技术与关

节转角反馈控制技术(图3),使得机器人轨迹精度达到 $\pm 0.35\text{ mm}$ ,重复轨迹精度 $\pm 0.063\text{ mm}$ ,已成功应用于空客 A350 机身及翼面部件的修配<sup>[5]</sup>。瑞典 NOVATOR 公司为波音、空客等知名飞机制造企业研制了机器人螺旋铣孔系统,以完成钛合金、复合材料等难加工材料的大直径孔的制孔作业,通过新工艺手段优化作业质量<sup>[6]</sup>。



图1 Electroimpact的ONCE制孔系统

Fig.1 ONCE drilling system of Electroimpact



图2 BROETJE公司RACe机器人制孔系统

Fig.2 BROETJE RACe robot drilling system



图3 弗劳恩霍夫协会的机器人铣削系统

Fig.3 Robot milling system of Fraunhofer

在机器人先进制造技术与装备领域,中国主要以高校和科研院所为主开展研究。其中,浙江大学开发的机器人精镗飞机交点孔加工系统(图4(a))采用末端执行器全闭环伺服控制的方法,利用激光跟踪仪将机器人绝对定位精度提升至 $\pm 0.2\text{ mm}$ <sup>[7-8]</sup>。南京航空航天大学研发了双机器人协同钻铆系统(图4(b)),集成了误差相似度的机器人精度补偿技术,并通过压力脚两侧压紧,有效提升了翼面类部件叠层材料的制孔精度与成形质量<sup>[9-11]</sup>。但与发达国家相比,中国在机器人高精度

作业关键技术与装备的研究起步较晚,仍处于技术论证与样机研制阶段,在相关技术领域还需继续深入研究。

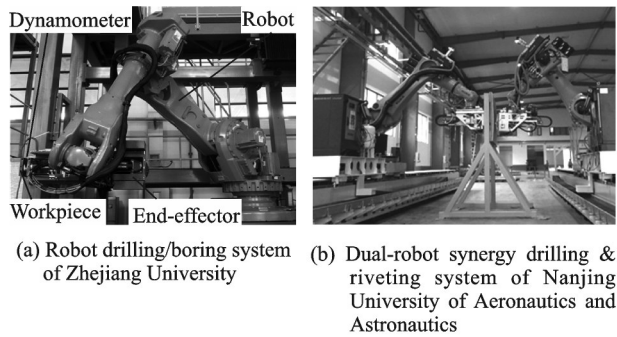


图4 国内典型机器人制造装备  
Fig.4 Typical domestic robot manufacturing equipment

综上所述,国内外基于工业机器人的典型高精度作业装备都采用各种精度控制技术以满足航空航天制造的技术需求。一方面,工业机器人作为一种多关节多连杆组合的刚柔耦合体,受到本体开式链结构的影响,即便是制造或控制过程中引入的微小误差,都会引起机器人末端位姿的较大偏差,如KUKA机器人在空载状态下的运动误差普遍达到了2~3 mm<sup>[12]</sup>;另一方面,工业机器人弱刚性的特点会导致重载状态下的末端定位与轨迹精度下降,平均500 N的末端负载,就会造成机器人末端大约1 mm的定位偏差,同时弱刚度特性也对作业稳定性产生了负面影响,难以获得理想的表面加工质量<sup>[13-14]</sup>。因此,较低的作业精度和较弱的结构刚度都是制约机器人在高精度作业领域应用的关键因素,提升系统刚度与作业精度是机器人作业装备在航空航天制造领域应用实现的必由之路。

## 2 作业刚度强化策略

机器人作业刚度的强化一方面可以提升加工稳定性,另一方面可以提升机器人对外部载荷作用下的末端位姿变形的抵抗力,从而保障机器人高质量高精度的加工作业。

影响机器人刚度性能的因素主要有以下3点:(1)机器人本体的结构及材料属性,主要影响机器人连杆结构刚度;(2)驱动及传动机构刚度,主要表现为关节驱动电机和减速器的扭转刚度以及电机的伺服刚度;(3)机器人的作业姿态,通过雅可比矩阵影响关节刚度向作业末端的映射,同时机器人结构质心随姿态的变化而改变,也会影响关节刚度的辨识结果。

机器人的本体结构和制造材料通常在设计阶段完成,现有机器人装备通常采用成熟的货架产

品,在工程应用中无法对其进行优化调整,在末端执行器安装辅助强化结构是一种可行的优化途径<sup>[15-16]</sup>。机器人关节的驱动与传动结构主要由电机与减速器构成,其选型与结构设计同样是在机器人设计阶段完成,虽然近年来国内外学者开展了机器人关节刚度主动控制的技术研究,但是其设计目的主要是提高运动的柔顺性,与加工任务的刚度优化要求相悖<sup>[17-18]</sup>。相较通过改进机器人本体结构来实现刚度强化,机器人姿态优化具有技术可行性高、任务适应性好、无需改变机器人结构和控制系统的优点,具有极高的工程应用价值。

### 2.1 基于辅助结构的刚度强化

机器人作业装备在切削加工作业过程中,由于切削力是一个周期性变化的外部载荷,加工过程中机器人的末端也会随之产生周期性振动,刀具轴向的振动会降低切深的准确性并影响切削表面质量,刀具切向的振动会造成制孔成形精度和加工轨迹的偏差。

切削作业任务中通过安装压力脚结构在工件表面辅助压紧是强化机器人末端刚度的有效手段,被认为属于结构优化设计的范畴。压力脚结构一方面通过压在工件表面的压紧力从而增加末端执行器在加工表面的摩擦力,从而实现刀具切向刚度的等效增强,解决加工过程中的末端侧向滑移问题,进而提升制孔圆度并降低铣削轨迹偏差。另一方面压力脚的压紧可以有效降低叠层材料制孔作业的层间毛刺,降低孔壁粗糙度。目前辅助压紧结构根据作业任务类型可以分为两类:

(1)针对点位加工制孔(制孔、镗孔等)的刚性压力脚:Lund大学的Olsson等针对机器人在制孔作业过程中采用刚性压力脚的方案(图5(a)),建立了附加压力脚的机器人刚度模型,揭示了压紧力对制孔径向刚度的强化机理<sup>[19]</sup>。南京航空航天大学的研究了压力脚对制孔作业质量的影响机理,通过建立压紧状态下的制孔质量量化评价,为压紧力优选和机器人加工性能评估提供了理论依据<sup>[20]</sup>(图5(b))。浙江大学的郭英杰等提出了基于压脚



图5 典型刚性压力脚结构  
Fig.5 Typical rigid pressure foot

结构的振动抑制方法,并成功应用于机器人精确镗孔作业。

(2)针对连续轨迹切削作业(铣削、磨削等)的柔性压力脚:目前仅仅在机床镜像铣中少量应用,可以实现曲面零部件连续轨迹作业过程中的持续稳定的压紧,但在机器人作业装备上还未见到类似产品,为双机器人协同作业刚度强化提供了一个可行思路<sup>[21-23]</sup>。

刚性压力脚具备结构简单、成本低和可快换的优点;而柔性压力脚结构较为复杂,通常采用模块化设计,借鉴镜像铣削机床的设计是填补该项空白的一条快捷之路,在未来可以对机器人连续轨迹精确加工作业的柔性末端执行器结构优化设计、工艺参数的优选及对加工质量的影响机理开展深入研究。

## 2.2 刚度最优导向的姿态优化

作为对现有机器人装备最具可行性的刚度提升方法,姿态优化目前的研究最为深入、技术最为成熟。针对切削作业,六自由度工业机器人在刀具轴向具备一个功能冗余自由度,使得对于同一个待加工位置,机器人理论上具有无数可达位姿。此外,为拓展机器人加工系统的工作空间,使其满足大型结构部件的装配加工任务,往往会引入机器人移动载台(又称为机器人的附加轴),如图6所示。其中,地轨和升降台会增加1个固有冗余自由度,自动导引小车(Automated guided vehicle, AGV)会增加2个固有冗余自由度,使得机器人作业系统的运动学冗余自由度达到两个以上。因此以刚度性能为优化目标,通过遍历可达机器人姿态,必然可以获得一个作业刚度最优姿态<sup>[24]</sup>。因此,刚度最优导向的姿态优化的两大关键技术包括:

(1)刚度性能评估指标,常见的刚度评估指标包括瑞丽商、力椭球及刚度椭球,其中刚度椭球既可以实现机器人作业末端综合刚度性能的评估,也可以实现各加工轴向刚度的精确表征,具有良好的任务适应性及计算准确性,目前的应用最为

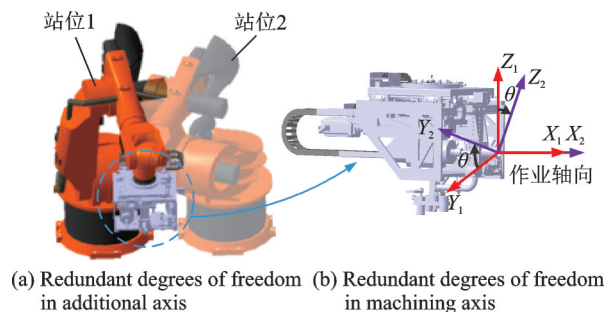


图6 基于冗余自由度的机器人作业姿态优化

Fig.6 Robot configuration optimization based on redundant degree of freedom

广泛<sup>[25]</sup>。

(2)姿态优化算法,刚度最优的姿态优化算法是一个典型的单目标优化问题,能够通过许多经典方法得到很好的解决,此外,在姿态优化过程中有时会加入运动学指标作为约束以规避不良机器人位姿,从而在姿态健康的前提下得到刚度最优的作业姿态。

国内外学者对刚度最优导向的姿态优化方法开展了大量研究。Sabourin等利用附加外部轴的机器人装备的冗余自由度,利用加权准则提出了结合运动学性能、机械力传递性能和刚度性能的综合优化目标函数,实现机器人点位加工的姿态优化以及连续切削作业的轨迹优化<sup>[26]</sup>。Vosniakos等将机器人加工作业姿态优化与机器人加工轨迹规划相结合,通过加工点的刚度强化实现机器人全过程运动轨迹的优化,使得全流程的作业刚度更加稳定与一致<sup>[27]</sup>。浙江大学的Guo等以机器人刚度椭球作为刚度评估指标,以加工系统作业位置与姿态和机器人可运动的最大关节角度为约束,通过优化作业姿态提高了机器人末端操作刚度,并在机器人制孔系统上对优化结果开展应用验证,优化后的作业姿态得到了更高的制孔轴向精度与镗窝深度精度<sup>[28]</sup>。上海交通大学的Xiong等以机器人关节极限和奇异位姿规避为约束,提出了刚度性能最优的铣削机器人作业姿态离散化搜索算法,加工试验表明,优化后的机器人轨迹显著提升了铣削作业的轨迹精度<sup>[29]</sup>。

姿态优化的刚度强化方法适用于所有自由度冗余的机器人作业系统,具有较高的强化效能与任务适应性。

## 3 作业精度补偿方法

作业精度是影响机器人装备在航空航天高精度制造领域推广的一大技术难题,在机器人作业任务中主要的位置或轨迹的误差来源可分为本体运动误差和加工载荷引起的误差两大类。运动误差是由机器人自身固有属性导致的,可以看作机器人末端空载状态下的定位误差。然而在工程应用中,尤其是制孔、铣削、磨削等重载加工作业中,高达数百牛顿的作业载荷造成的误差往往可以达毫米级。因此,仅仅补偿机器人运动误差难以满足机器人在高精度制造领域的精度需求。

根据针对的误差来源可以将机器人作业精度补偿方法分为以下两类:

(1)运动误差预测方法:修正机器人运动误差可有效提高机器人本体绝对定位精度,即传统精度

补偿方法,此类方法操作简便、经济有效、应用最为广泛。运动误差预测方法根据误差标定空间的不同区分为运动学标定(关节空间)与机器人非运动学标定(笛卡尔空间),其中运动学标定主要涉及机器人运动学建模与参数误差识别的问题,而非运动学标定目前常见的借助于误差采样结果的解决方案,通过空间相似性或者深度学习算法实现目标位置的误差预测。

(2)作业误差补偿方法:为满足机器人作业系统在重载作业环境下的高精度需求,补偿载荷引起的定位误差是不可或缺的环节。国内外学者研究和提出的解决方案主要分为两类:基于模型的误差预测方法,基于传感器的误差补偿方法。其中,基于模型的误差预测方法又可以根据补偿执行阶段分为离线补偿与在线补偿,主要取决于误差模型输入量是否需要在线获取。基于传感器的误差补偿方法通过外界测量手段直接测量机器人的作业误差,常见手段是基于末端反馈的全闭环补偿技术及基于关节反馈的半闭环补偿技术,具备理论上最高的补偿精度。机器人作业精度补偿方法体系如图 7 所示。

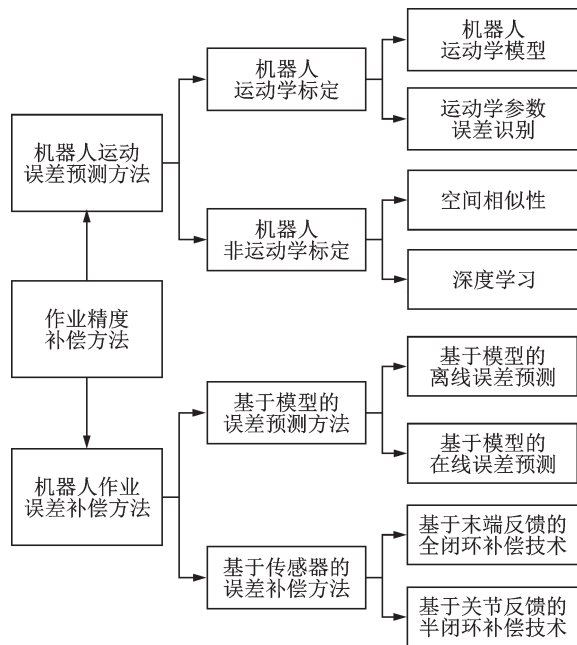


图 7 机器人作业精度补偿方法体系

Fig.7 Method system of robot precision compensation

### 3.1 机器人运动误差预测方法

#### 3.1.1 机器人运动学标定

##### (1) 机器人运动学模型

机器人运动学模型是研究机器人特性的理论基础。1955年提出的 Denavit-Hartenberg 模型(简称 D-H 模型)是最经典的机器人运动学建模方法,该模型用连杆长度、连杆扭角、连杆偏距以及关节

转角定义相邻 2 个机器人关节在空间中的坐标系变换关系,通过全部关节的变换关系的传递从而完成机器人运动学建模(图 8)。但是,当相邻关节轴平行或近似平行时,微小的平行度误差就会导致运动学参数奇异的问题,为解决该问题,文献[30]提出了修正型 D-H(Modified D-H, M-DH)模型,在原有的 4 参数建模基础上额外增加了一个旋转的参数,使用 5 个参数进行机器人运动学建模。另外,Stone 等提出了 S 模型,该模型拥有一套与 D-H 建模法不同的坐标系的建立规则,采用 6 个参数(3 个表示旋转,3 个表示平移)来描述每个连杆,S 模型可以实现与 D-H 模型的相互转化<sup>[31]</sup>。Okamura 等提出了指数乘法,使用若干个指数矩阵的乘积实现机器人建模,该方法运动学参数连续变化,有效解决了模型参数的突变问题<sup>[32]</sup>。

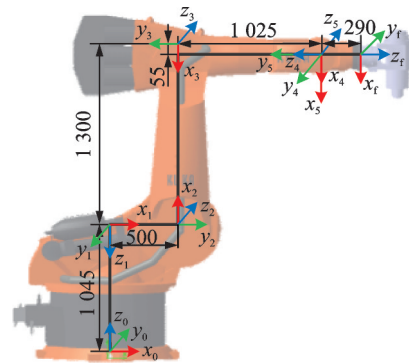


图 8 机器人 D-H 运动学模型

Fig.8 D-H kinematics model of robot

D-H 运动学模型与 M-DH 运动学模型是目前应用最为广泛的运动学参数标定技术,建模方便且通用性强,完全可以满足机器人作业系统的运动学建模需求。

##### (2) 运动学参数误差识别

运动学参数识别通常被看作典型回归问题来处理。求解机器人运动学参数识别问题的最简单方法是最小二乘法,但当机器人的雅可比矩阵接近奇异时参数辨识的准确度会明显下降,因此通常采用迭代的方式进行求解。

在最小二乘法的改进算法中,L-M 算法被广泛地应用于机器人运动学标定。L-M 算法中的参数能够随着执行过程的推进而不断改变,有效解决了高斯-牛顿迭代法由于初始值盲选或逆矩阵不存在影响计算结果的问题。Motta 等采用 L-M 算法完成了机器人的参数误差的迭代求解<sup>[33]</sup>。洪鹏等利用 L-M 算法对机器人几何误差和关节柔度误差进行识别,并提出了基于空间网格的变参数误差模型,有效解决了参数误差空间分布不均匀的问题<sup>[34]</sup>。此外,模拟退火算法和极大似然估计法等最

小二乘改进算法也被应用于机器人运动学参数识别与求解<sup>[35]</sup>。

扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman filter, EKF)是另一种运用较为广泛的机器人运动学参数辨识方法。Omodei等采用扩展卡尔曼滤波器对PUMA机器人进行参数识别,并且将结果与非线性优化、线性迭代进行对比,表明EKF能够获得参数误差的不确定度等额外信息,同时效率最高<sup>[36]</sup>。Park等使用扩展卡尔曼滤波器分别对两种机器人进行了运动学误差辨识<sup>[37]</sup>。

近年来人工智能算法也被逐步用于机器人运动学参数识别。Zhong等应用多层前馈神经网络和递归神经网络针对PUMA机器人开展了参数误差识别,有效提升了机器人的绝对定位精度,与重复定位精度持平<sup>[38]</sup>。Jang等采用径向基函数神经网络针对DR06工业机器人进行了识别,同时补偿了几何误差和非几何误差,将机器人的最大定位误差减小了68.7%,达到1.8 mm<sup>[39]</sup>。但此类方法求得的最优解一般为局部极值,识别精度偏低。

机器人运动学标定技术虽然能够有效识别机器人的运动学误差,仍有一些非几何误差不能被识别。因此,若想进一步提升机器人装备的运动精度,非几何误差的补偿同样需要考虑。

### 3.1.2 机器人非运动学标定

由于影响机器人定位精度的各误差源作用机理复杂且相互耦合,建立一个包含所有误差源的机器人真实运动学模型是难以实现的。于是,研究者转变标定思路,将机器人等效为一个“黑盒子”,不考虑机器人误差源的具体作用机理,只研究机器人末端定位误差与关节转角之间的映射关系,建立机器人定位误差库,进而实现机器人位姿误差的评估与补偿。

周炜等提出了基于反距离加权的空间网格插值补偿法,将机器人最大绝对定位误差减小至0.386 mm<sup>[40]</sup>。Zeng等提出误差相似度的概念,认为当机器人的各关节输入越相近时,对应的定位误差存在相似性,通过建立定位误差与关节转角的映射关系,对目标点定位误差进行预测,同时采用误差后置处理补偿策略,无需修改机器人控制参数即可补偿定位误差,将机器人绝对定位精度提高至0.3 mm<sup>[41-42]</sup>。以上方法都是基于机器人的定位误差空间相似性,分别从笛卡尔空间和关节空间对位姿误差进行预测,具有模型简单、补偿效果好的特点。此外,何晓煦等在几何参数辨识的基础上对机器人定位残差进行空间相关性插值补偿,将机器人最大绝对定位误差减小至0.296 mm<sup>[43]</sup>。

神经网络是一种模拟大脑神经网络的智能算

法,具有良好自适应和容错能力,能够学习数据的内在规律。利用机器人采样误差数据训练神经网络模型进而实现机器人定位误差的预测和补偿是机器人非运动学标定的一种有效新方法。Wang等建立神经网络模型来逼近机器人定位误差曲面,表现出比传统的线性插值方法更高的精度<sup>[44]</sup>。Nguyen等使用扩展卡尔曼滤波算法识别了机器人的几何误差,再分别以参数标定后的残余误差与关节转角作为人工神经网络(Artificial neural network, ANN)的输出与输入,对机器人的非几何误差进行补偿<sup>[45]</sup>。姜春福利用基于状态信息的递归神经网络算法建立机器人逆运动学模型,以Power Cube TM机器人的末端位置和关节角作为训练样本,使得单向定位误差降低了22.9%<sup>[46]</sup>。

机器人非运动学标定方法避免了复杂的机器人误差建模过程,能够对机器人的综合误差进行识别和补偿,克服了机器人运动学标定的参数识别不准确的问题。机器人非运动学标定方法对机器人控制系统没有开放要求,因此对不同机器人作业系统具有较高的普适性。此外,该方法从原理上可以视为一种数值估计方法,数值估计所使用的数据越多,标定的准确度也越高。

机器人运动误差预测方法的对比如表1所示。

表1 机器人运动误差预测方法对比

Table 1 Comparison of prediction methods of robot motion error

运动误差预测方法	控制精度	优缺点
运动学标定	取决于辨识精度 ( $\leq 0.5$ mm)	成本低,通用性好;精度一般,计算复杂
非运动学标定	取决于建立模型的准确性 ( $\leq 0.3$ mm)	成本低,通用性好,精度较高;建模复杂

## 3.2 机器人作业误差补偿方法

### 3.2.1 基于模型的误差预测方法

基于模型的误差预测方法是在机器人参数辨识与误差建模的基础上,实现机器人作业状态下位姿误差的预测与补偿。对于外部载荷引起的机器人柔性误差,根据作业载荷的获取途径可以分为在线与离线补偿。

#### (1) 基于模型的离线误差预测

基于模型的离线误差预测方法不采用任何传感设备,其技术核心在于作业载荷预测模型与机器人刚度模型的准确建立。

Abele等在加工曲面类零件时,通过对参考样件试加工,并详细测量样件的几何尺寸从而计算出机器人轨迹偏差,根据测量误差反向修正机器人控制程序,但是该方法工作量大,工程应用困难<sup>[47]</sup>。Belchior等利用材料成型的有限元模型实现了机器人作业载荷的仿真预测,结合机器人刚度模型实现了机器人铣削轨迹误差的离线修正,轨迹误差降低到0.3 mm以内<sup>[48]</sup>。Tyapin等建立了机器人静态铣削力模型,通过优化算法找到适应不同任务的力学参数,实现机器人切削载荷的离线预测,通过力学模型与机器人刚度模型相结合实现了机器人铣削轨迹的离线补偿,铣削轨迹精度达到0.2 mm以内<sup>[49]</sup>。Slavkovic等采用类似的思路,结合铣削切削力模型与机器人刚度模型完成机器人加工位姿的偏差预测,实现了机器人0.1 mm的铣削轨迹精度<sup>[50]</sup>。综上所述,离线误差预测方法中力学建模的准确性仍然是制约机器人作业误差预测的关键因素。

### (2) 基于模型的在线误差预测

基于模型的在线误差预测方法借助力/力矩传感器直接测量机器人加工载荷,作为刚度模型的输入,实现机器人末端位姿误差的在线精确计算,该方法克服了离线误差预测方法的建模精度问题,其实现工程应用的技术难点在于误差补偿的实时性问题。

Zaeh与Roesch等通过工业机器人的刚度建模以及切削力的在线测量实现了机器人铣削轨迹误差的在线预测,并通过构建模糊控制器,实现了误差修正时的系统快速响应,将轨迹误差降到0.4 mm以内。Cordes等提出了一种基于关节刚度和反向误差的铣削轨迹偏差预测模型,通过切削载荷在线采集,在关节空间实现了铣削轨迹的在线误差修正,圆弧铣削轨迹精度达到0.2 mm以内<sup>[51]</sup>。Klimchik等研究了机器人刚度建模方法与切削力预测模型,提出了两步走的机器人铣削轨迹误差控制策略,首先将预估的理论铣削力代入机器人的刚度模型,在控制程序中实现机器人作业轨迹的预修正,在加工过程中,通过传感器实际测得的切削载荷二次修正作业轨迹,这种离线修正与在线补偿相结合的补偿策略在大幅提高了铣削轨迹的加工精度<sup>[52]</sup>。

### 3.2.2 基于传感器的误差补偿方法

基于传感器的误差补偿方法跳过了误差源的分析建模以及误差参数的辨识,不关注于误差模型本身,通过传感器直接对误差源测量以实现机器人作业位姿的在线修正。理论上基于传感器的误差补偿方法可以实现机器人作业系统的运动误差和

载荷误差的同时补偿,按测量数据源及补偿原理可以把基于传感器的误差补偿方法分为基于末端反馈的全闭环补偿技术和基于关节反馈的半闭环补偿技术。

#### (1) 基于末端反馈的全闭环补偿技术

基于末端位姿实时反馈的机器人全闭环精度补偿方法通过直接测量和补偿笛卡尔空间的位姿误差,实现机器人作业精度的有效提升。常见的位姿误差测量手段包括激光跟踪仪和双目或多目立体视觉测量系统。

Moeller等提出了一种基于激光跟踪仪的铣削机器人作业精度在线控制方法,利用铣削主轴上安装的适配器T-Mac以测量机器人末端作业位姿,通过逆向补偿将机器人的铣削轨迹误差降低到0.3 mm以内。Premium航空技术公司利用激光跟踪仪引导两台工业机器人协同执行飞机复合材料机身的桁条粘贴作业,将安装公差降低到0.3 mm以内。Gharaaty等通过双目视觉6D测量系统实现了机器人末端位姿的实时跟踪和动态校准,将Fanuc M20-iA机器人的位置精度提高到 $\pm 0.05$  mm、姿态精度提高到 $0.05^\circ$ <sup>[53]</sup>。Schneider等针对工业机器人加工过程中几何误差引起精度低的问题,通过引入光学反馈测量系统,提出了一种自适应实时跟踪的模块化控制方法,使得机器人加工精度达到了 $\pm 0.05$  mm<sup>[54]</sup>。天津大学的史晓佳等也构建了基于激光跟踪仪的机器人作业误差在线测量系统,并通过KUKA RSI实现位姿误差的实时补偿,将机器人绝对定位精度提高到 $\pm 0.08$  mm、姿态精度 $0.01^\circ$ <sup>[55]</sup>。浙江大学的郭英杰等将激光跟踪仪闭环反馈技术应用用于飞机交点孔机器人精镗加工系统,将镗孔位置精度提高到 $\pm 0.05$  mm,轴向精度提高到 $0.05^\circ$ 。

无论激光跟踪仪还是视觉系统的检测精度都高于机器人重复定位精度,因此,全闭环补偿方法在理论上具有最高的补偿精度。但是在线测量设备的价格昂贵,且需要长时间在线作业,维护成本较高;同时对产品开敞性要求较高,否则容易发生断光导致测量失效,在成本和作业环境适应性上都有明显不足。

#### (2) 基于关节反馈的半闭环补偿技术

关节半闭环反馈控制技术是在关节轴处安装高分辨率的角度检测装置如光栅尺、磁栅尺等,通过对关节角精确控制构成关节反馈控制来保证末端的位置精度。

美国EI公司推出的Accurate robot高精度机器人制孔系统(图9)通过在各个关节上安装光栅尺作为第2测量系统,直接测量负载前后机器人关

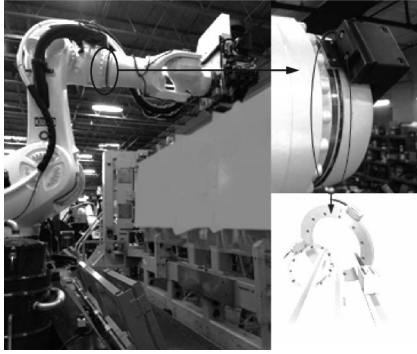


图9 美国EI基于关节反馈的半闭环补偿方案

Fig.9 Half closed loop compensation scheme based on joint feedback of American EI company

节的转角误差并执行实时的闭环补偿,将机器人在制孔作业中的定位精度提升到 $\pm 0.25$  mm。德国弗劳恩霍夫协会研制的机器人移动铣削机器人通过结合西门子840 Dsl高精度数控系统与关节光栅

测量系统,使机器人铣削作业的轨迹精度达到0.35 mm以内。德国KUKA公司通过在SE系列机器人的前3个关节安装磁栅尺,将磁栅尺的输出信号反馈到机器人控制系统,修正后的机器人绝对定位精度提高至 $\pm 0.3$  mm。

关节反馈的半闭环作业误差补偿技术较好地消除了关节转角引入的定位误差,理论补偿效果仅次于末端位姿反馈的全闭环的控制方法,但是也存在开发成本高、开发周期长的缺陷。

综上所述,基于模型的误差预测方法相对基于传感器的误差补偿方法使用性价比和任务适应性更高。同时,基于模型的误差预测方法更有利于机器人误差源及误差传递规律的研究,指导机器人的优化设计与工程应用。

机器人作业误差补偿方法的对比如表2所示。

表2 机器人作业误差补偿方法对比

Table 2 Comparison of error compensation methods for robot operation

项目	作业误差补偿方法	控制精度	优缺点
基于模型的误差预测	离线预测	取决于载荷模型准确度( $\leq 0.3$ mm)	成本低,精度较高,通用性好;受建模精度影响较大
	在线预测		
基于传感器的误差补偿	基于关节反馈的半闭环误差补偿	最大限度地减小了关节空间误差( $\leq 0.25$ mm)	精度较高,适应性高;开发周期长,成本高
	基于末端反馈的全闭环误差补偿		
		取决于检测精度( $\leq 0.1$ mm)	精度最高,成本及环境要求高;通用性差

#### 4 基于工业机器人的航空航天制造技术发展趋势

通过机器人刚度强化技术和精度补偿技术,机器人作业装备具备了执行航空航天制造高精度重载作业的能力。但是,针对新一代航空航天产品的制造,机器人作业装备体现出大型结构件的制造效率低、作业状态在线检测能力弱、作业规划与离线编程准确度低、作业柔性和可拓展性较差等不足,严重制约了机器人作业装备加工精度与质量的进一步提高。因此,在保障作业精度的基础上,应不断创新作业模式,攻关关键技术,以满足航空航天制造机器人作业装备协作化、智能化和柔性化的技术需求。以下4条为面向航空航天制造的机器人作业关键技术的发展趋势:

##### (1) 机器人集群化

航空航天大型复杂构件设计、制造和测量等关键技术列入制造业重点发展领域的优先主题之一,其高精度、短流程和高柔性的制造特点对加工

技术和装备提出了新的挑战。由于工件尺寸大,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剧增,迫切需要资源分散、快速重构的新制造模式和装备。高柔性、智能化的多机器人平台是实现离散型装备制造任务的有效手段,在适用性及可重构性上具有显著的优势。因此,多机器人集群化协同加工模式是未来大型构件加工的发展趋势,如图10所示,需要攻关的关键技术主要包括:多机器人原位加工协同机制、多机器人协同任务规划、大场景自主移动单元精度控制、多激励源振动在线监测与抑制策略。



图10 集群式机器人在飞机装配的应用

Fig.10 Application of cluster robot in aircraft assembly



(2) 末端执行器智能化

随着机器人作业任务呈现出产品结构复杂、开敞性差、材料体系多的特点,对末端执行器的加工环境状态感知与作业状态的监控能力提出了更高的要求,末端执行器将不仅仅是作业执行装备,同时应支持机器人控制系统对作业状态在线精确把控与智能决策。因此,研制智能末端执行器是实现智能化作业的必由之路,如图 11 所示,未来研究重点应该从多传感器集成策略、多源感知信息融合处理、多功能组件模块化设计、结构轻量化小型化优化这几个方面开展。

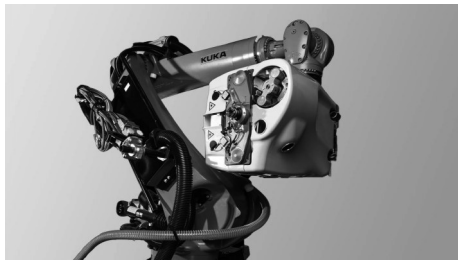


图 11 KUKA-Alema 智能末端执行器  
Fig.11 KUKA-Alema intelligent end effector

(3) 任务规划在线动态化

作业任务在线动态规划是提升机器人智能化、复杂作业柔性与加工精度的新途径,通过实际工况的实时感知和产品的在线测量,智能识别复杂产品因制造、装配和装夹产生的形位误差,并在预设加工程序基础上进行任务的动态重规划,实现控制指令的实时调整和修正,解决传统自动化设备对产品装配误差适应性较差的问题,如图 12 所示。需要重点攻关的技术点包括:在线主动感知任务设计、特征提取与误差识别、动态自适应规划算法。

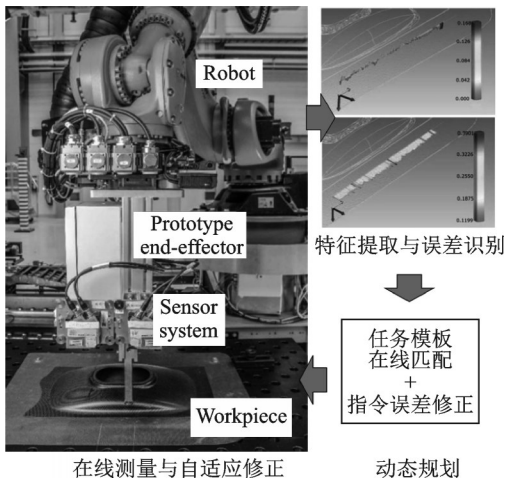


图 12 机器人任务在线动态规划应用于零件装配

Fig.12 On-line dynamic planning of robot task in parts assembly

(4) 作业人机协同化

即使机器人装备在高精度复杂作业任务中越来越广泛地投入应用,但受到传统工业机器人自身结构与执行机构的性能限制,仍然无法满足全部复杂产品的制造要求。人机协作模式,如图 13 所示,就是将机器人作为人类的助手,在不分隔、无护栏的环境下由人类负责柔性、触觉和灵活性要求比较高的工序,同时利用机器人快速、准确的特点来负责完成重复性工序,实现优势互补<sup>[56]</sup>。人机协作已经成为解决传统工业机器人难以应对高效率、柔性化和复杂作业难题的有效新途径,其研究重点主要包括:机器人拖拽示教控制、机器人关节碰撞检测、机器人接触力感知与控制、机器人行为设计与自主学习。



图 13 KUKA 人机协作机器人  
Fig.13 KUKA human-machine cooperation robot

5 结 论

高作业精度的实现是机器人装备在航空航天制造业应用的前提,本文分别从机器人装备在航空航天制造业的应用、机器人作业刚度强化策略、机器人作业精度补偿方法等几个方面介绍了机器人高精度制造关键技术的发展与研究现状。目前,国内外的研究者对机器人作业系统的刚度强化以及精度补偿方法已经有了较全面、深入的研究,基本满足了机器人作业装备在航空航天领域高精度重载作业应用的技术需求。但是精度补偿方面仍存在包括机器人作业负载建模准确性、基于模型的误差补偿方法的实时性、全闭环补偿技术的工况适应性问题,刚度强化策略也存在理论创新不足、不适用连续轨迹加工任务的缺陷,均有待进一步深入研究。

此外,面对航空航天制造领域大尺寸、高精度和高柔性的生产特点,机器人作业技术与装备呈现出机器人集群化、末端执行器智能化、任务规划在线动态化、作业人机协作化的发展趋势,以进一步提升机器人作业对复杂工况的任务适应性及加工效能,对推进机器人装备的普及与应用,实现航

空航天制造业向智能化的转型升级具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] WAN J, CAI H, ZHOU K. Industrie 4.0: Enabling technologies[C]//Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things. New York, USA: IEEE, 2015: 135-140.
- [2] 沈建新, 田威. 基于工业机器人的飞机柔性装配技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(2): 181-189.  
SHEN Jianxin, TIAN Wei. Aircraft flexible assembly technology based on industrial robots[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 46(2): 181-189.
- [3] 王战玺, 李树军, 赵璐, 等. 移动机器人铣削制孔系统基准检测[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 281-287.  
WANG Zhanxi, LI Shujun, ZHAO Lu, et al. Benchmark detection of mobile robot milling hole making system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 51(3): 281-287.
- [4] DEVLIEG R. High-accuracy robotic drilling/milling of 737 inboard flaps[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 1373-1379.
- [5] MÖLLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, et al. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2017, 10(2): 100-109.
- [6] 康仁科, 杨国林, 董志刚, 等. 飞机装配中的先进制孔技术与装备[J]. 航空制造技术, 2016(10): 16-24.  
KANG Renke, YANG Guolin, DONG Zhigang, et al. Advanced hole making technology and equipment in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(10): 16-24.
- [7] 郭英杰. 基于工业机器人的飞机交点孔精镗加工关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
GUO Yingjie. Research on key technologies of precision boring of aircraft intersection holes based on industrial robots[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [8] GUO Y, DONG H, WANG G, et al. Vibration analysis and suppression in robotic boring process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2016, 101: 102 - 110.
- [9] 李鹏程, 田威, 廖文和. 基于双机器人装配系统的多功能末端执行器设计[J]. 机电一体化, 2014(5): 62-66.  
LI Pengcheng, TIAN Wei, LIAO Wenhe. Design of multifunctional end effector based on dual robot assembly system[J]. Mechatronics, 2014(5): 62-66.
- [10] 周振锋, 田威, 廖文和. 面向飞机部件装配生产线的自动送钉系统研究[J]. 航空精密制造技术, 2014, 50(1): 34-37.  
ZHOU Zhenfeng, TIAN Wei, LIAO Wenhe. Research on automatic nail feeding system for aircraft component assembly line[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014, 50(1): 34-37.
- [11] ZHANG Lin, TIAN Wei, LI Dawei, et al. Design of drilling and riveting multi-functional end effector for cfrp and aluminum components in robotic aircraft assembly[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 35(3): 529-538.
- [12] 尹仕斌. 工业机器人定位误差分级补偿与精度维护方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.  
YIN Shibin. Research on classification compensation and precision maintenance method of positioning error of industrial robots[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [13] CEN L, MELKOTE S N, CASTLE J, et al. A wireless force-sensing and model-based approach for enhancement of machining accuracy in robotic milling[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(5): 2227-2235.
- [14] ZAEH M F, ROESCH O. Improvement of the machining accuracy of milling robots[J]. Production Engineering, 2014, 8(6): 737-744.
- [15] KLIMCHIK A, CHABLAT D, PASHKEVICH A. Static stability of manipulator configuration: Influence of the external loading[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2015, 51: 193-203.
- [16] 陈世钟, 刘延遂, 吴品弘, 等. 基于刚度性能的机器人臂长优化[J]. 机械与电子, 2015(6): 67-72.  
CHEN Shizhong, LIU Yansui, WU Pinhong, et al. Optimization of robot arm length based on stiffness performance[J]. Machinery & Electronics, 2015(6): 67-72.
- [17] CESAR C O, FERNANDO R C, EMILIO G G. On stiffness regulators with dissipative injection for robot manipulators[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12(65): 1-15.
- [18] 尹鹏, 李满天, 查富生, 等. 基于解耦线性化的变刚度关节动态刚度辨识[J]. 机器人, 2015, 5(37): 522-528.  
YIN Peng, LI Mantian, CHA Fusheng, et al. Dynamic stiffness identification of variable stiffness joints based on decoupling linearization[J]. Robot, 2015, 5(37): 522-528.
- [19] OLSSON T, HAAGE M, KIHLMAN H, et al. Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback[J]. Robotics and Computer-

- Integrated Manufacturing, 2010, 26(1): 24-38.
- [20] BU Y, LIAO W, TIAN W, et al. Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application[J]. Precision Engineering, 2017, 49: 388-400.
- [21] 祝小军, 向兵飞, 汪洋华, 等. 飞机蒙皮镜像铣切原理与算法分析[J]. 教练机, 2015(2): 24-28.  
ZHU Xiaojun, XIANG bingfei, WANG Yanghua, et al. Principle and algorithm analysis of mirror milling of aircraft skin[J]. Trainer, 2015(2): 24-28.
- [22] 马文博, 余康, 罗泰. 机身蒙皮设计与镜像铣加工方法[J]. 中国科技信息, 2016(13): 91-93.  
MA Wenbo, YU Kang, LUO Tai. Fuselage skin design and mirror milling method[J]. China Science and Technology Information, 2016(13): 91-93.
- [23] 鲍岩, 董志刚, 朱祥龙, 等. 蒙皮镜像铣削支撑技术的研究现状和发展趋势[J]. 航空学报, 2018, 39(4): 42-53.  
BAO Yan, DONG Zhigang, ZHU Xianglong, et al. Research status and development trend of skin mirror milling support technology[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 39(4): 42-53.
- [24] ZARGARBASHI S H H, KHAN W, ANGELES J. Posture optimization in robot-assisted machining operations[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 51: 74-86.
- [25] AJOUDANI A, TSAGARAKIS N G, BICCHI A. On the role of robot configuration in Cartesian stiffness control[J]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015, 2015: 1010-1016.
- [26] SABOURIN L, SUBRIN K, COUSTURIER R, et al. Redundancy-based optimization approach to optimize robotic cell behaviour: Application to robotic machining[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2015, 42(2): 167-178.
- [27] VOSNIAKOS G C, MATSAS E. Improving feasibility of robotic milling through robot placement optimization[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2010, 26(5): 517-525.
- [28] GUO Y, DONG H, KE Y. Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 35: 69-76.
- [29] XIONG G, DING Y, ZHU L. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 19-28.
- [30] HATATI S A. Robot arm geometric link parameter estimation[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. New York, USA: IEEE, 1983: 1477-1483.
- [31] STONE H W, SANDERSON A C. Statistical performance evaluation of the S-model arm signature identification technique[C]//Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York, USA: IEEE, 1988: 939-946.
- [32] OKAMURA K, PARK F. Kinematic calibration using the product of exponentials formula[J]. Robotica, 1996, 14(4): 415-421.
- [33] MOTTA J M, CARVALHO G C, MCMASTER R S, et al. Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2001, 17(6): 487-497.
- [34] 洪鹏, 田威, 梅东棋, 等. 空间网格化的机器人变参数精度补偿技术[J]. 机器人, 2015, 37(3): 327-335.  
HONG Peng, TIAN Wei, MEI Dongqi, et al. Variable parameter precision compensation technology of space gridding robot[J]. Robot, 2015, 37(3): 327-335.
- [35] HORNING R J. A comparison of identification techniques for robot calibration[D]. Cleveland: Case Western Reserve University, 1998.
- [36] OMODEI A, LEGNANI G, ADAMINI R. Calibration of a measuring robot: Experimental results on a 5 DOF structure[J]. Journal of Robotic Systems, 2001, 18(5): 237-250.
- [37] PARK I W, LEE B J, CHO S H, et al. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(6): 1059-1067.
- [38] ZHONG X L, LEWIS J M. New method for autonomous robot calibration[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York, USA: IEEE, 1995: 1790-1795.
- [39] JANG J H, KIM S H, KWAK Y K. Calibration of geometric and non-geometric errors of an industrial robot[J]. Robotica, 2001, 19(3): 305-701.
- [40] 周炜, 廖文和, 田威. 基于空间插值的工业机器人精度补偿方法理论与试验[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 42-48.  
ZHOU Wei, LIAO Wenhe, TIAN Wei. Theory and experiment of precision compensation method for industrial robots based on spatial interpolation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 42-48.
- [41] ZENG Y, TIAN W, LI D, et al. An error-similarity-based robot positional accuracy improvement method for a robotic drilling and riveting system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9/10/11/12): 2745-2755.
- [42] 曾远帆. 基于空间相似性的工业机器人定位精度补偿技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

- ZENG Yuanfan. Research on positioning accuracy compensation technology of industrial robots based on spatial similarity[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [43] 何晓煦, 田威, 曾远帆, 等. 面向飞机装配的机器人定位误差和残差补偿[J]. 航空学报, 2017, 38(4): 292-302.
- HE Xiaoxu, TIAN Wei, ZENG Yuanfan, et al. Robot positioning error and residual compensation for aircraft assembly[J]. Chinese Journal of Aeronautics 2017, 38(4): 292-302.
- [44] WANG D, BAI Y. Improving position accuracy of robot manipulators using neural networks[C]//Proceedings of Conference Record—IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. New York, USA: IEEE, 2005: 1524-1526.
- [45] NGUYEN H N, ZHOU J, KANG H J. A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network[J]. Neurocomputing, 2015, 151 (P3): 996-1005.
- [46] 姜春福, 李庆翠, 李萍. 基于神经网络的机器人运动模型辨识及实验验证[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(1): 144-151.
- JIANG Chunfu, LI Qingcui, LI Ping. Identification and experimental verification of robot motion model based on neural network[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(1): 144-151.
- [47] ABELE E, SCHÜTZER K, BAUER J, et al. Tool path adaption based on optical measurement data for milling with industrial robots[J]. Production Engineering, 2012, 6(4/5): 459-465.
- [48] BELCHIOR J, GUILLO M, COURTEILLE E, et al. Off-line compensation of the tool path deviations on robotic machining: Application to incremental sheet forming[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(4): 58-69.
- [49] TYAPIN I, KALDESTAD K B, HOVLAND G. Off-line path correction of robotic face milling using static tool force and robot stiffness[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. New York, USA: IEEE, 2015: 5506-5511.
- [50] SLAVKOVIC N R, MILUTINOVIC D S, GLAVONJIC M M. A method for off-line compensation of cutting force-induced errors in robotic machining by tool path modification[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9/10/11/12): 2083-2096.
- [51] CORDES M, HINTZE W. Offline simulation of path deviation due to joint compliance and hysteresis for robot machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1/2/3/4): 1075-1083.
- [52] KLIMCHIK A, PASHKEVICH A, CHABLAT D, et al. Compliance error compensation technique for parallel robots composed of non-perfect serial chains[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(2): 385-393.
- [53] GHARAATY S, SHU T, XIE W F, et al. Accuracy enhancement of industrial robots by on-line pose correction[C]//Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems. New York, USA: IEEE, 2017: 214-220.
- [54] 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(1/2/3/4): 3-15.
- [55] 史晓佳, 张福民, 曲兴华, 等. KUKA工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 1-7.
- SHI Xiaojia, ZHANG Fumin, QU Xinghua, et al. KUKA industrial robot pose measurement and online error compensation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 1-7.
- [56] 吴丹, 赵安安, 陈恳, 等. 协作机器人及其在航空制造中的应用综述[J]. 航空制造技术, 2019, 62(10): 24-34.
- WU Dan, ZHAO Anan, CHEN Ken, et al. Overview of collaborative robots and their applications in aviation manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 24-34.

(编辑:陈璐)