



机器人钻铆系统研究现状及发展趋势

Research Status and Development Trends of Robot Drilling and Riveting System

中航工业北京航空制造工程研究所 杜兆才 姚艳彬 王 健



杜兆才

博士,高级工程师,主要从事飞机数字化柔性装配技术研究,发表论文40余篇,SCI、EI收录15篇。

飞机结构件连接质量极大地影响飞机气动外形的准确性和寿命^[1],

工业机器人具有成本低、灵活性高、安装空间小及自动化程度高等优点,对工件的适应性好,且可以通过扩展轴长距离移动,能完成多个区域的钻铆,而无需移动工件,比传统的自动钻铆方式效率高。借助专用编程软件,可以实现自动加工程序的离线编程和模拟加工。机器人钻铆技术突破了自动钻铆机等设备对加工位置和加工灵活性的局限,将自动钻铆技术推向一个更高的高度。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.04.026

而连接质量难以满足新型飞机对高性能的要求,已成为我国飞机制造业的薄弱环节^[2]。铆接是主要的连接形式,采用先进的制孔和铆接技术是提高飞机装配质量的有效技术途径。

据统计,70%的飞机机体疲劳失效事故起因于结构连接部位疲劳失效,其中80%的疲劳裂纹发生于

连接孔处,因此,制孔质量至关重要。手工制孔质量一致性差,提高精度需借助于专门的工装和夹具,成本高,可复用性差。手工制孔过程繁琐,且易形成缺陷。手工铆接容易产生孔径超差、铆钉孔错位、埋头窝过深、镢头偏斜及夹层有间隙等缺陷。由于手工铆接力较小,铆钉杆镢粗不均

匀,钉杆呈圆锥形,易使工件产生翘曲变形,且手工铆接难以胜任高干涉量的铆接。

采用自动化钻铆设备实现大型构件的制孔和铆接是提高装配质量和效率的有效途径^[3]。据统计,自动铆接效率比人工铆接高10倍,由于质量稳定可靠,结构疲劳寿命可提高5~6倍。目前主要有3种自动化钻铆设备:自动钻铆机、龙门式自动钻铆系统和机器人自动钻铆系统。前两种设备应用范围有限,要求构件的曲率变化较小,且对空间比较局促的区域无能为力。随着工业机器人的位置精度、负载能力的提高,以及误差补偿技术、高速切削技术、实时仿真技术、软件技术的发展,工业机器人成为一种高效的工作平台。与自动钻铆机等设备相比,工业机器人具有成本低、灵活性强、安装空间小及自动化程度高等优点^[4],对工件的适应性好,且可以通过扩展轴长距离移动,能完成多个区域的钻铆,而无需移动工件,比传统的自动钻铆方式效率高。借助专用编程软件,可以实现自动加工程序的离线编程和模拟加工。机器人钻铆技术突破了自动钻

铆机等设备对加工位置和加工灵活性的局限,将自动钻铆技术推向一个更高的高度。

机器人自动钻铆技术发展现状

机器人自动钻铆技术在国外航空制造领域应用广泛^[5-9],发展比较成熟。2001年,美国Electroimpact公司设计了一套机器人自动钻削系统(ONCE),用于波音F/A-18E/F的机翼后缘襟翼的制孔和铤窝^[10],在25.4mm厚的钛合金上加工直径9.5mm的孔时,将铤窝深度误差控制在0.064mm以内。美国EOA公司与波音公司联合研制一种机器人多功能钻削系统^[11],可进行钛合金、铝合金、复合材料及叠层材料的飞机蒙皮的制孔、铤窝和铤孔。瑞典Novator公司开发了机器人轨迹制孔系统(Orbital E-D100)。2009年,德国宝捷为欧直公司研发一种用于飞机货舱门制孔的机器人装配系统^[12],如图1所示。意大利BC公司设计了双机器人自动钻铆系统,用于波音787机尾部件的自动钻铆和涂胶。巴西航空技术学院研制了双机器人铆接系

统^[13],A380及A320系列机翼壁板,波音787机身框架、波音747地板、波音737系列大梁、F-16复合材料垂尾壁板及C-130飞机梁腹板等部件的装配都应用了机器人自动钻孔系统或机器人自动钻铆系统。

近年来,国内各大主机厂纷纷与研究院所和高校合作研发机器人钻铆系统。2010年,中航工业沈飞与北京航空航天大学合作,研制了制孔末端执行器,搭建了机器人自动制孔系统,用于铝合金、钛合金及叠层材料的制孔。通过切削力反馈优化主轴转速和进给速度等参数,在7075-T6铝合金板上加工6mm孔时,可将孔径误差控制在0.04mm以内,孔定位精度达0.3mm,制孔效率达到4个/min^[14-16]。2010年,中航工业成飞与南京航空航天大学针对飞机机翼部件的自动制孔需求,合作研制了壁板类部件/组件/零件数字化柔性装配、智能制孔系统^[17-19]。2011年,中航工业陕飞与浙江大学合作研制了机器人制孔系统,并用于某型机身尾段制孔。2013年,中航工业西飞与西北工业大学合作研制了机器人制孔系统。上述系统尚不具备铆接功能。2014年,中航工业北京航空制造工程研究所研制了机器人数字化钻铆系统,可实现制孔和铆接等功能。

总体来看,国外已经突破了机器人钻铆的相关关键技术,实现了工程应用,积累了丰富的工程应用经验。与国外相比,我国机器人钻铆技术水平还存在较大的差距,主要体现在以下几方面。

(1)分析和设计缺乏系统性,部分关键技术尚未完全突破,例如,动力学分析技术、机器人误差补偿技术、离线编程与仿真技术等,缺乏支撑多品种产品快速、精确钻铆的机器人钻铆技术体系,影响了机器人钻铆技术的推广应用。

(2)关键功能部件和系统集成



图1 宝捷公司的Race机器人制孔系统

原创能力不足。存在关键功能部件结构简单、功能单一、可靠性差及使用寿命不长等现象,关键功能部件缺乏标准化、模块化和系列化;系统功能、精度及稳定性与国外差距大,国外的机器人钻铆系统一般具有制孔、镗窝、插钉及铆接等基本功能,较为先进的还具有涂胶、去毛刺、吸除切屑及安装自锁螺栓或其他紧固件等功能。而国内研制了多种机器人制孔系统,对机器人制孔技术进行了较深入的研究,但研制的机器人制孔系统大多仅具有制孔功能,机器人钻铆系统的功能尚不完备,对机器人钻铆技术的研究也较少。

(3)自动钻铆工艺方法及技术积累不足。大量工艺参数尚未优化,针对铝合金构件的钻铆技术的研究较多,但针对钛合金、复合材料及叠层材料等难加工构件的钻铆技术的研究少。

国内机器人钻铆技术存在问题及解决途径

机器人钻铆技术的构成如图2所示。

目前,制约国内机器人钻铆技术发展的瓶颈主要体现在工业机器人定位精度尚不能完全满足飞机钻铆需求、手眼标定精度低且标定过程复

杂、法向检测方法亟待完善、压力脚压紧效果不易控制、镗窝深度难以精确控制、铆接单元技术落后、供钉可靠性不易保证、离线编程与仿真实用性有待提高等方面。

1 工业机器人定位精度尚不能完全满足飞机钻铆需求

工业机器人的定位精度不高,不能满足飞机钻铆对系统定位精度的需求,因此,需要探索满足高精度要求且易于实施的误差补偿方法。有两种途径可以提高机器人精度。

(1)误差预防法。即着力于减少误差源,提高制造、装配精度。这种方法实施难度较大,且长期运行后

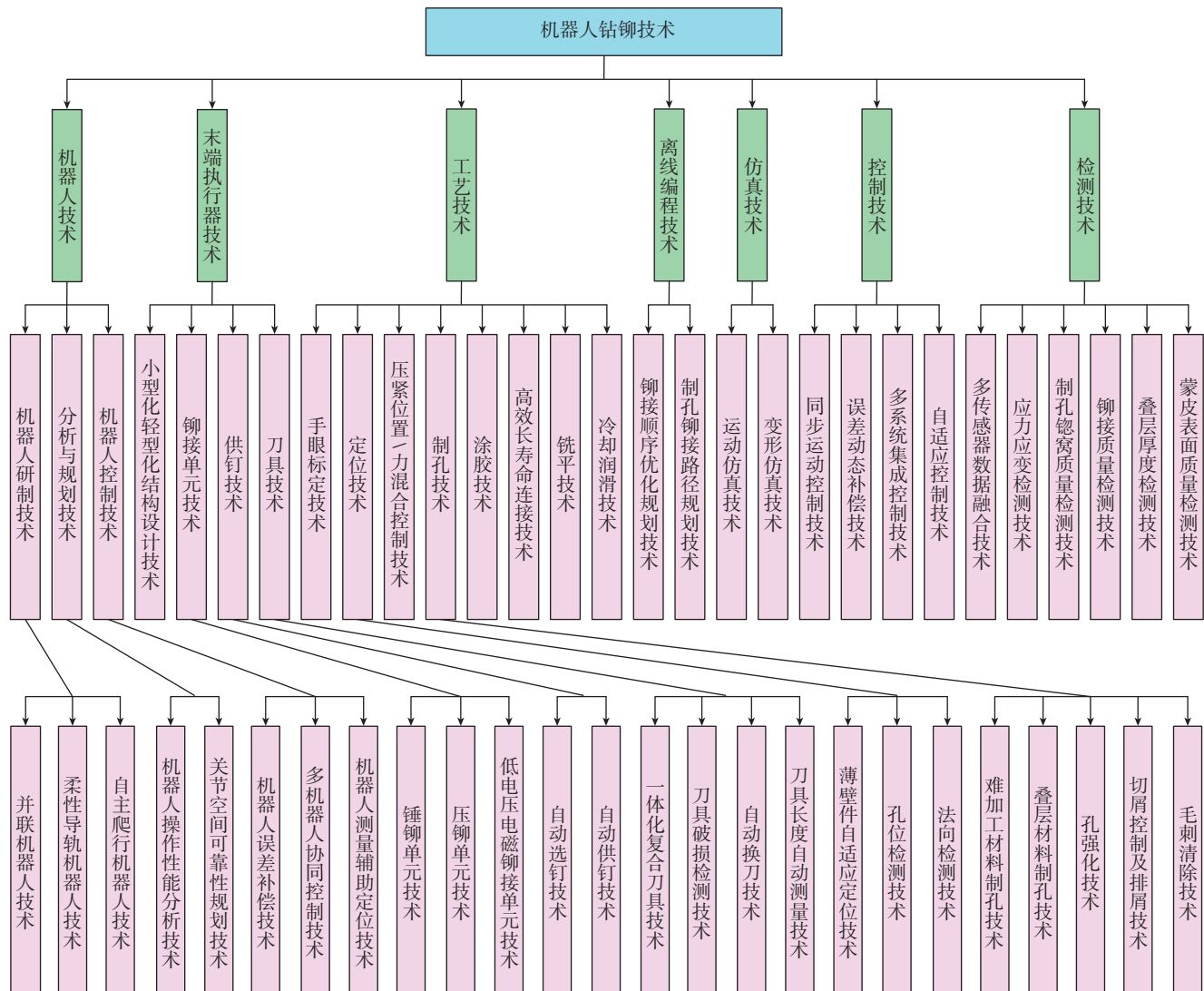


图2 机器人钻铆技术的构成

的定位精度仍无法保证。

(2) 误差补偿法。辨识机器人参数,通过修改控制参数或增加外部控制算法来提高定位精度。

误差补偿方式分为在线补偿和离线补偿。不随时间变化的误差,如杆长误差、关节零位误差及惯性参数误差等,可以离线补偿;而随时间或环境因素变化的误差,如温度变化引起的误差等,则需要在线补偿。误差补偿方法有两种。

(1) 增加末端反馈,实现全闭环控制。通常引入视觉识别系统、力或加速度计传感器等提取数据,或采用嵌入式控制方法,将数据快速反馈给控制系统。该方法可以达到很高的定位精度,但成本投入较高,实施难度较大。

(2) 标定。标定技术分为3个层次^[20]: 关节级参数标定(确定关节名义运动值与实测值之间的关系)、运动学参数标定(建立完整的运动学模型,包含所有几何参数及关节柔性等非几何参数)及动力学参数标定(确定各结构的惯性参数)。目前,大多数研究集中在运动学参数标定方面。标定后可使机器人精度更高,使离线编程实用化成为可能,确保仿真任务真正用于实际生产。

常用的运动学标定方法包括:基于测量拟合的标定方法、基于坐标系转换的标定方法及基于距离精度的标定方法。基于测量拟合的标定方法的研究成果包括:将连杆的几何参数误差作为最主要误差源^[21]的标定法、虚拟封闭运动链标定法^[22]、误差网格标定法^[23]及基于误差相似度的标定法^[24-25];基于坐标系转换的标定方法的研究成果包括:CPC模型法^[26]、MDH模型法^[27]及基于POE方程改进的标定方法^[28];基于距离精度的标定方法的研究成果包括:虚拟机坐标系机器人几何参数的标定方法^[29]、基于距离误差模型的标定方法^[30]及3种双机器人标定

方法(基于距离的标定方法、基于平面精度的标定方法、基于直线精度的标定方法)^[31]。

在动力学参数标定方面,关节的质量、刚度及阻尼等属性是动力学模型中的重要组成和技术难点。如仅以弹簧或阻尼单元来简化和抽象,误差较大^[32-33],建模必须以合理的假设为前提。例如,对于关节中的间隙,可以采用非线性的弹簧—阻尼模型,研究关节间隙的接触动力学特性。

标定中常用的分析方法包括:运动学模型参数标定法和神经网络标定法。运动学模型参数标定法需要建立复杂的模型,有些因素很难考虑,在动态变化的环境中缺乏柔性;神经网络标定法无须建模,也不需要辨识参数,且考虑了多种因素引起的误差^[34],实施比较简单,可以实时补偿。

标定方法通常对测量工具提出较高的要求,例如,需使用单线电位计、球杆仪、激光测量系统及电子经纬仪等,或测量仪器昂贵,或测量过程复杂。

经过误差补偿后,结合机器人工作空间配置的可靠性评价方法与规划策略^[35],可合理规划机器人的工作空间^[36]。

目前,机器人误差补偿方法的研究仍不完善,尚未完全满足飞机装配精度的需求。其中,模型参数标定法考虑的因素不够全面,还需更细致地考虑更多的因素,并探索求解效率更高和更稳定的计算方法;采用神经网络法时,需要在选择训练数据的比例及与问题相适应的网络规模方面,总结经验数据,提高模型准确性。因此,应完善、改进和拓展现有的机器人误差补偿方法,为机器人在飞机柔性自动化装配上的应用扫除技术障碍。

2 手眼标定精度低且标定过程复杂

为了实现机器人的自主定位和

自动制孔,需建立精度和效率高、环境适应能力和机动性强并且可动态测量的非接触式在线测量系统。机器人制孔的特点决定了需采用非固定视点视觉领域的手眼视觉技术,即手眼标定技术(确定机器人末端执行器的刀具坐标系和相机坐标系之间的关系)^[37-41]。

手眼标定方法可分为静态标定(离线标定)和动态标定(在线标定)^[42]。根据离线标定方程的特点,又分为线性标定法、非线性标定法和分步标定法。线性标定法比较简捷,使用广泛,但精度不高。非线性标定法引入了非线性方程,模型较准确,但计算复杂,对初始条件的要求比较严格,如使用不当,容易出现非线性搜索优化计算陷入局部最小的情况。分步标定法综合上述两种方法的优点^[43-44],适合相机经常变动的场合,但应注意累积误差的问题。在线标定方法是一种动态标定法,通过机器人的理想轨迹、速度和实际轨迹、速度等的偏差,不断修正参数,在动态过程中完成标定^[45-47]。

为了提高计算方法的鲁棒性,通常要采集尽量多的冗余信息,过程比较复杂,且计算速度会受到影响。钻铆过程中,需要简化标定步骤,实现实时标定,以提高系统的控制品质。因此,需要协调处理鲁棒性与实时性,达到最佳效果。

3 法向检测方法亟待完善

孔的垂直度取决于刀具轴线与制孔点位处法线的重合程度,因此,检测制孔点位处法向十分重要。计算曲面上任一点处法向量,可采用累加弦长法、样条曲面法和三角网格法等,计算比较复杂,往往需要获取曲面上几十个数据点的坐标,才能获得较高的计算精度,由于测量技术、工作效率及设备结构的限制,通常无法测量加工曲面上的大量数据点,因此,不便采用上述方法。通常可采用三点平面法^[48]和叉积法^[49]。为了提

高平面的拟合精度,要考虑激光测距仪的安装误差^[50]。由于工件是曲面,也可采用四点球面法^[51]和二次曲面拟合法^[52]。上述方法均预设了某种假设(平面、球面或二次曲面),但未明确提出假设成立的前提条件及拟合误差,缺乏对主要影响因素的分析。需要在传感器标定、测量点选择、参数灵敏度分析及拟合误差分析等方面进行深入和系统的研究,完善法向检测方法。

4 压力脚压紧效果不易控制

在制孔铆接前,要将末端执行器调整到预定位姿,压力脚压紧工件。原因包括以下几方面。

(1) 叠层材料之间存在间隙,如不消除,可能导致切屑进入间隙。

(2) 由于工件刚度不足,在制孔时如不压紧,会因切削力产生变形,影响加工质量。

(3) 应预先消除机器人关节间隙。

(4) 增强系统的动态刚度,抑制制孔过程中的振动。

(5) 压紧力的反作用力可降低末端执行器因承受重力产生的位置和角度偏差。

压紧时,有3种控制方法^[53]。

(1) 压力脚压力不变(大于进给抗力)。

制孔时,机器人始终承受恒力,便于保证系统的稳定性和孔的质量。不利因素是将接触力从压力脚转移到刀具上,如果接触力小,可能沿着工件表面发生滑移,影响孔的加工质量;如果接触力大,变形显著,且不利于克服进给抗力。

(2) 控制压力脚位置。

当制孔时,总的接触力增加,机器人发生扭转和偏移,要根据反馈系统数据及时补偿位姿误差。前提条件是反馈系统的响应速度足够快。

(3) 控制刀具受到的接触力。

容易导致刀具损坏,且不利于控制孔的法向。

保持压力脚压力不变的控制方法便于控制镗窝深度和孔的法向。应选择合适的压力脚压力,如压力过大,机器人及工件会产生较大的变形,不利于制孔精度控制;如压力过小,难以抑制制孔过程中工件的振动,出现毛刺;如压力小于进给抗力,则压力脚和壁板之间出现间隙,对稳定性造成影响,也影响孔的加工质量和定位精度。

只控制压力脚的压紧力或压紧位置,都会带来不利影响,导致新的误差出现。因此,应将两种控制方案有机地结合起来,提出压力脚力/位置混合控制方法,达到最优压紧效果。

5 镗窝深度难以精确控制

制孔的难点之一是镗窝深度的精确控制^[54]。原因包括以下几方面。

(1) 薄壁工件刚度低,容易变形。

(2) 由于机器人关节存在间隙,传动系统存在柔性环节,承受压力脚压力的反作用力,关节转轴产生偏斜和位移,体现为机器人“回退”。

(3) 加工过程中刀具对工件施加作用力,当刀尖刚接触到工件时,工件和机器人都产生较大变形,当钻透工件时,都产生了回弹。

由于压力脚始终压紧工件,工件制孔区域位置变动等同于压力脚的位置变动。因此,可在压力脚上安装位置检测传感器,建立压力脚位置实时补偿的进给轴闭环控制系统^[55],将工件的变形量实时补偿到压力脚的位移上,可有效地控制镗窝深度误差。为了不影响压力脚位置实时反馈的效果,应注意抑制压力脚的振动或采取措施过滤振动信号。

6 铆接单元技术落后

通常采用冲压铆接方式^[56-57]。机器人由于受传感器测量带宽的限制,不能对快速冲击及时响应,难以适应需要瞬时加速或较大力矩的场合。因此,冲击力较大的铆接设备不适于安装到机器人上。限于缺少合

适的铆接单元,国内研制的机器人制孔系统多数不具备铆接功能。

随着对飞机性能和结构寿命要求的不断提高,传统铆接工艺已难以满足要求^[58],具有加载率高、应变速率大、铆钉变形均匀、噪声低、后坐力小、铆接工艺质量稳定及效率高等优点的低电压电磁铆接设备(应力波铆接设备)应运而生^[59-60]。中航工业北京航空制造工程研究所利用自主研发的小型低电压电磁铆接设备开发了铆接单元,搭建了机器人钻铆系统。

现有的电磁铆接设备在电缆线上损失的能量较大,降低了设备利用率,限制了其在大范围的钻铆作业中的应用。因此,应改进电磁铆接设备,降低能量损耗,从而提高设备能力。

7 供钉可靠性不易保证

稳定可靠地供钉是实现高效、高质量铆接的保障。自动供钉需要解决料斗形式、夹持方式和输送方式3方面问题^[61]。输送方式包括轨道式和管道式两种。轨道式对输送路径要求较高,适用于从高到低输送且输送路径固定的情况。管道输送利用气流推动,通过输钉管输送,该方式定向稳定,对铆钉种类没有限制,且对输送路径有较好的适应能力,可用于从低到高输送及输送路径多变的情况。

机器人的高灵活性和承载的局限要求末端执行器与自动供钉系统分离,增加了供钉难度。由于自动钻铆系统对输送可靠性要求高,且末端执行器频繁变换位姿,输送路径多变,且有时需要从低到高输送,因此,必须采用管道式输送方式。为了保证输送的可靠性,需要设计轨道的长度、倾角及截面形状,并提出防止铆钉在输送管中卡死的必要条件^[62-63]。输送路径变化导致输钉管会有不同的弯曲半径和输钉高度等,增加了供钉的难度,容易出现卡钉问题。根据铆钉在输钉管中的受力和运动情况,

可以计算满足铆钉正常输送要求的输钉管最小弯曲半径、管道材质及尺寸、最小供气气压等^[64]。

8 离线编程与仿真实用性有待提高

离线编程是飞机自动化装配区别于其他机械产品数控编程的重要特征,包含连接件信息提取模块、数控自动编程模块、刀位文件生成模块、离线仿真模块及在线监测模块等部分。

仿真主要包括运动仿真和变形仿真。运动仿真用于检查作业过程中可能发生的干涉现象,检验钻铆路径的效率,以产品的整体加工时间为目标,优化数控代码。变形仿真用于分析由压紧力、铆接力产生的位置偏差等。通过仿真分析获取变形量,进行补偿,控制最终的变形量。采用自动钻铆过程中铆钉和薄壁件的应力应变分析方法^[65],研究壁板自动钻铆连接行为及变形量分析技术有助于解决自动钻铆工艺参数优化、变形控制等问题,从而实现稳定、高效生产。大型结构件的钻铆点数以千计,不可能依靠实时测量调整来保证装配精度,因此,需要分析预测钻铆误差。可基于 Kirchhoff 薄板理论建立制孔力和误差之间的关系,将铆接过程视作力平衡状态下的受迫变形,提出误差分析方法^[66]。在变形预测的基础上,可以采取铆接顺序优化规划方法、铆接区域间的路径优化规划方法进行预补偿。

有很多因素会影响机器人钻铆系统工作性能,有些影响因素之间还存在相互作用,且作用机理复杂。因此,从便于分析的角度出发,难以将所有因素均纳入离线编程与仿真工作中,只能兼顾影响因素的复杂性和计算的可行性,判别并考虑各种工况下的主要影响因素,从而得到可行的离线编程与仿真结果。

机器人自动钻铆技术发展方向

(1) 末端执行器的模块化和可重构化。

采用模块化设计方法,研制具有友好接口的模块化功能部件和控制模块,能快速重构适应新的工作环境和工作任务的机械系统和控制系统,使末端执行器具有可重构性和可扩展性,提升末端执行器性能。

(2) 机器人平台多样化。

近年来,快速发展的并联机器人综合了并联机构和数控机床的优点,负载能力、刚度和精度优于串联型工业机器人,混联机器人又兼具并联机器人和串联机器人的优点,并联机器人、混联机器人均可作为新型的机器人平台。柔性导轨机器人和自主爬行机器人也可作为某些工况下的机器人平台。

(3) 控制系统开放化。

满足互操作性、可移植性、可扩充性和互换性要求,提供开发工具和环境、产品升级、更新、修改及维修等功能,各个层次均对用户开放,用户可方便地扩展和改进;便于集成应用各种单元技术,具有强大的适应性和灵活配置能力,对新产品、新技术提供开放性接口,便于顺应新技术的发展,及时补充新功能。

(4) 钻铆技术智能化。

具有环境感知能力,集成移动通信、信息获取、智能软件与人机交互等技术,采用可以动态实时感知、测量、捕获和传递信息及反馈控制的新技术、新方法和新流程,使机器人钻铆系统各个层面的工作协同更密切,对环境、目标等信息的获取和处理更智能,从而日益提高的质量需求,迫切需要改进、完善和提高机器人钻铆技术,在多传感器信息融合的基础上,实现钻铆过程的智能调度、规划、仿真、优化和钻铆系统的智能监控、诊断、补偿、控制。

(5) 机器人钻铆系统应用集成化。

针对飞机柔性装配生产线的需

求,实现机器人钻铆系统与其他系统的互联互通,形成实时分布式的制造系统网络。采集和处理钻铆过程中的工艺参数、设备状态和业务流程等结构化数据,同时还将与声、像、图、文等多媒体信息处理实现高度集成与融合,实现物理制造空间与信息空间在多维度感知信息上的无缝对接,实现产品流程、工艺流程和制造过程信息流的集成。

结束语

机器人钻铆技术是飞机柔性化自动装配技术的一个重要应用和研究方向,体现了飞机装配的自动化、数字化、柔性化和集成化趋势,是当今国内航空制造业亟待突破的关键技术之一。积极发展机器人钻铆技术对于提高我国航空制造水平,缩短与国外先进制造技术的差距,提升国产飞机的国际竞争力,推动我国航空制造业快速发展,具有重要意义。我国当前快速发展的航空制造业为机器人钻铆技术的发展提供了良好的机遇和巨大的发展空间,必须形成统一认识,立足于自主研制,实现核心技术的重点突破,掌握核心能力,提升机器人钻铆技术水平。

参考文献

- [1] 张全纯,汪裕炳,瞿履和,等. 先进飞机机械连接技术. 北京: 兵器工业出版社, 2008.
- [2] 范玉青. 飞机数字化装配. 航空制造技术, 2006(10): 44-48.
- [3] 卜泳,许国康,肖庆东. 飞机结构件的自动化精密制孔技术. 航空制造技术, 2009(24): 61-64.
- [4] 冯晓波. 机器人准确制孔技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [5] Robert I. Drilling with force feedback. Sweden: Linköping University, 2009.

本刊共有参考文献 66 篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 玲犀)