

# 航空航天制造领域工业机器人 发展趋势\*

Developing Trend of Industrial Robot in Aerospace Manufacturing Industry

西北工业大学机电学院 冯华山 秦现生 王润孝



冯华山

博士,主要从事智能机器人仿生运动控制、航空特种制造装备技术研究。主持或参与国家自然科学基金、国家863计划、国家科技支撑计划、国防基础科研、陕西省科技统筹创新工程计划项目等8项科研课题。

\* 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2011KTCQ01-01)资助。

工业机器人必须从结构、驱动上加强设计优化,降低功耗、提高负载/自重比;关节必须模块化集成,充分考虑碰撞力检测和主动柔顺控制。为此,新型机器人结构设计、轻量模块化结构设计、包含弹性环节的柔性关节设计和控制、新型碰撞检测传感器设计与配置、智能避碰实时检测与快速响应等成为面向航空航天制造工业机器人的关键技术。

近年来,工业机器人因其重复精度高、可靠性好、适用性强等优点,已经在汽车、电子、食品、化工、物流等多个行业广泛应用并日趋成熟,有效提高了产品质量和生产效率、节约了劳动力和制造成本、增强了生产柔性和企业竞争力。此外,对保障人身安全、改善劳动环境、减轻劳动强度、降低材料消耗发挥了十分重要的作用。而目前航空航天产

品制造过程仍旧是劳动密集、工序繁复、工况恶劣、辅以大量工装夹具并以手工制造为主。自动化生产能力不足,已成为制约提高武器装备可靠性和生产能力的瓶颈。在我国大力发展航空航天的时代背景下,航空航天制造企业应用工业机器人进行自动化生产,对企业生产模式转型升级、装备先进制造能力提升具有十分重要的意义和价值。

在航空航天制造领域,工业机器人不仅要完成典型的点胶、焊接、喷涂、热处理、搬运、装配以及检测等作业,还要进行钻孔、铆接、密封、修整、复合材料铺敷、无损探伤等特种作业任务。与传统制造行业不同,航空航天产品制造具有尺寸大、结构复杂、性能指标精度高、载荷重、环境洁净度高以及材料特殊等特点,对工业机器人的结构、性能、动作流程和可靠性等都提出了更高的要求。此外,航天产品多品种、小批量的生产特点还要求工业机器人具有良好的作业柔性和可扩展性,通过快速重构可形成适应新环境、新任务的机器人系统<sup>[1]</sup>。

## 国内外发展情况

针对行业特种需求,国外工业机器人企业与航空航天制造企业已经密切合作,面向部件装配和人机协作等应用开展工业机器人系统专项研制,以提高企业竞争力。2012年底,在欧盟第七框架计划(FP7)“未来工厂”项目的资助下<sup>[2]</sup>,德国、奥地利、西班牙等国家联合发起VALERI计划,其目的是在3年内实现机器人先进识别和人机协作,并能够集成到航空部件生产中,使机器人能够直接与人并肩工作,消除人机之间的防护隔离,将人从简单枯燥的工作中解放出来,进而从事更有附加值的工作。该计划参与单位包括弗劳恩霍夫工业操作和自动化研究院、KUKA实验室、FACC、Profactor、IDPSA、PRODINTEC、空客军机等多家航空和机器人研究与制造企业。英国复合材料中心NCC与GKN等航空航天企业合作投资4百万美元开发双机械臂式自动纤维铺放系统,不仅比手工作业节约材料,同时也替代了龙门式工装,降低了投资成本。此外,美国、加拿大、日本等国家的制造企业也纷纷投巨资开发面向航空制造领域的工业机器人系统。

21世纪以来,国内有一大批企

业开始自主研制或与科研院所合作研制工业机器人并已经步入初步产业化阶段<sup>[3]</sup>。但在总体技术上我国机器人与国外先进水平相比还有很大差距,仅相当于国外90年代中期的水平。由于高性能交流伺服电机和高精密减速器等关键单元部件和器件始终依赖进口,我国工业机器人产品的成本居高不下。瑞典的ABB,日本的FANUC、YASKAWA、MOTOMAN,德国的KUKA,美国的Adept Technology,意大利COMAU等品牌工业机器人占据了我国90%的应用市场。受其影响,国内面向航空航天产品制造和装配的专用工业机器人系统研制才刚刚起步,还没有形成规模和较完备的种类。

尽管我国工业机器人技术及产品在航空部件装配、航天产品生产以及卫星产品批量研制中逐渐得到应用和推广,与国外技术发展相比仍面临着巨大挑战。本文通过分析和梳理近年来国内外航空航天制造领域的工业机器人技术研究进展和发展趋势,探讨其在非传统制造领域的技术需求以及我国工业机器人技术

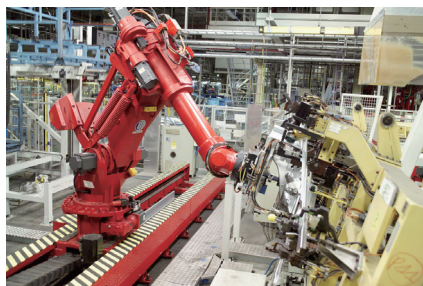
人系统,其制造和控制成本将非常昂贵。另外,航空航天大尺度产品在制造过程中通常不便移动,采用专用、固定基座工业机器人的解决方案并不经济,因此,移动式工业机器人成为新途径。与传统工业机器人相比,同一台移动式工业机器人可以在多个不同的位置上完成同样的作业任务,所需的编程时间较短,能够提高机器人的工作效率和柔性。

面向大尺度产品制造的移动式工业机器人的一种典型配置是将工业机器人系统安装在移动导轨上。根据安装位置的不同,该结构又可分为龙门式(图1(a))和地轨式(图1(b))。工业机器人的精度是由地面参考系到末端执行器之间所有关节和连杆误差的积累所决定的。轨道式配置构造通常会受到工作载荷以及结构受力等原因的困扰,造成结构变形并进一步影响加工精度。轨道变形具有随机性,给位置精度补偿也造成很大的困难。此外,轨道结构会占用较大的工作空间和地面,增加了厂房投入和维护成本。

移动式工业机器人的另一种典



(a) 龙门式



(b) 地轨式

图1 导轨式移动工业机器人

研究在该领域亟需解决的关键技术。

## 技术需求分析

### 1 移动式工业机器人

汽车、电子、食品等行业广泛应用的工业机器人通常是面向中小规格产品制造,在航空、船舶以及风机等大尺度产品制造过程中将面临巨大的挑战。如果按比例放大工业机



图2 KUKA概念型移动机器人平台

型配置是在轮或履带移动平台上安装工业机器人,从而达到围绕零件移动制造的目的(图2)。这种方案提高了装备柔性,特别是解决了航空航天大尺度产品不易搬运移动的问题。与气垫式、导轨式移动平台相比,对厂房基建、气源供应无严格要求,可节省外部设备的投入和维护费用。轮或履带式移动工业机器人加工误差的解决途径是利用大尺度位置测量系统提供的非接触位置数据,实时补偿机器人末端执行器与加工零件之间的误差,从而提高加工精度。美国西南研究院(Southwest Research Institute, SwRI)面向商用或军用飞机喷涂任务,采用Vetex公司的麦卡纳姆轮全向移动平台、莫托曼工业机器人以及尼康的iGPS系统构造了移动式工业机器人系统MR ROAM 2,其末端精度能够达到0.5英寸,可以满足目前喷涂应用要求。如果采用惯性传感器,其精度有望达到1mm甚至更高。奥地利航空公司采用KUKA公司的全向移动omniMove系统更换空中客车飞机引擎,其操作时间从16小时减少到5小时,移动精度可达毫米级。卡耐基梅隆大学国家机器人工程中心(NREC)、CTC公司以及空军研究实验室采用移动式工业机器人构成军机表面涂层激光剥离系统(图3)。该系统根据机型大小对机器人进行灵活编组,不仅代替了传统的机械摩擦或化学腐蚀去除法,避免了有害废料和空气污染,还降低了工作量和处理时间。我国采用可移动式工业机器人系统配以激光跟踪仪实现了卫星舱板的自动和半自动模式辅助对接装配,解决了舱板翻转机构与舱板停放机构的分离以及多自由度自动调节和联动,减少了专用支架车的数量和维护成本,满足了多工位、多时段的多个卫星装配使用要求<sup>[4]</sup>。

移动式机器人在航空航天领域潜在的应用还包括大部件装配、喷涂、喷砂、无损检测等表面处理,焊

接铆接,核、生物、化工等环境的表面清洁以及快速原型制造等。

## 2 多臂协同工业机器人

尽管单臂工业机器人在自动化制造中具有诸多优点,但其在空间分布性、功能分布性、任务并行性以及作业容错性等方面存在局限性,特别是在航空领域大尺度部件制造与装配中其灵活性、可靠性、抗振性和负载能力等方面的局限性尤为突出,因此,80年代以来多臂工业机器人系



图3 采用移动式工业机器人进行飞机涂层

统引起了广泛重视。

多臂工业机器人系统通常被分为松耦合型和紧耦合型<sup>[5]</sup>。松耦合型多见于汽车制造等自动化装配,每个工业机器人有独立的作业对象并且不形成整体的闭链结构;紧耦合型系统各机器人与作业对象直接接触并形成相互作用力,进而构成存在内力作用的闭链机构。采用紧耦合型多工业机器人系统进行协同作业,能够有效抑制振动、减少变形、替代专用工装夹具,可用作大型、重载、薄壁、细软等易变形部件的搬运、调姿、对接、装配等任务(图4)。

双臂机器人是多臂协同机器人中应用较为广泛的一类,通常模仿人的双臂结构和交互行为,能够在较小的工作空间完成灵巧装配与检测任务,可代替人在有害、易燃、易爆化工产品制备,高洁净度、高真空度电子

产品装配等环境中作业(图5)。面向航空制造领域的双臂协同机器人系统需要具备两类功能。一类是遥控操作功能,能够根据操作者的动作指令远程控制机器人精确、平稳地实现作业;另一类是根据机器人左右臂手交互的力觉感知和任务流程指令自主完成装配、检测任务。前者强调动作跟随的准确性和稳定性,后者强调动作的柔顺性和协调性。

两个以上工业机器人的协同控

制问题要比双臂机器人系统更加复杂,在应用上目前还不如双臂协同机器人广泛。不过其面向更复杂操作的能力正逐渐受到研究机构的关注。日本研究人员采用5个配备力学和视觉传感器的工业机器人开发了可以弯折和捆扎线缆的多臂机器人系统(图6)。该系统可用于航空产品的自动化布线生产。日本东北大学、韩国首尔国立大学机械与航空航天学院围绕多移动工业机器人

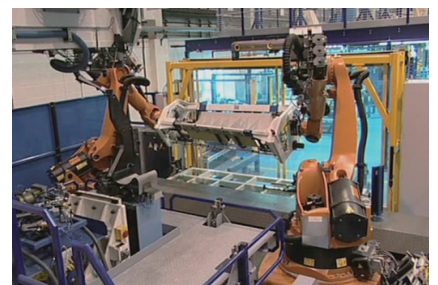
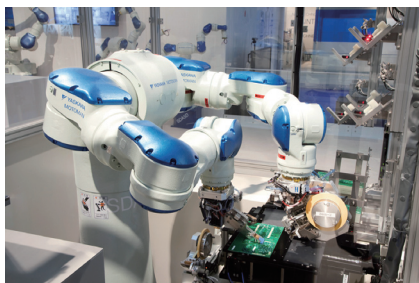
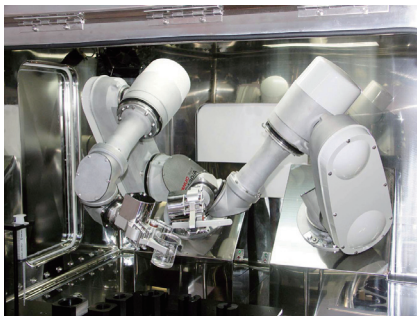


图4 空中客车A400M D-nose 结构装配系统



(a) 日本涩谷 Hoppmann 公司开发的遥操作式化工品隔离制备设备



(b) 日本 YASKAWA 的莫托曼双臂机器人在电路板上进行软质胶带材料的铺贴

图5 双臂协同工业机器人

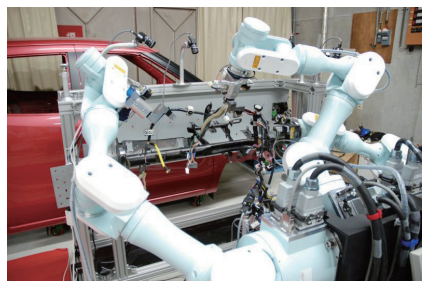
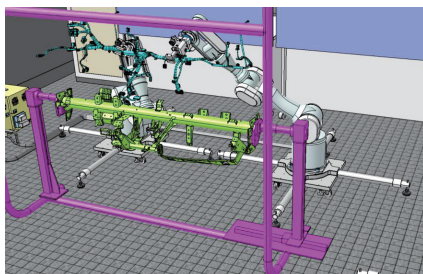


图6 日本研制的多臂机器人协同自动布线  
协同作业的结构和控制技术开展研究,实现了能够与人互动的协同作业能力,可对同一部件进行搬运和调姿操作。

此外,多臂协同工业机器人还可用于航空复合材料的自动铺放生产,与人工作业相比,双臂自动铺放系统可节约材料 75%,部件重量比金属减重 20%。在 NASA 的敏捷机械手

测试(DMT)设备以及阿尔贡国家实验室的 CP-5 重水反应堆中均用到了液压驱动的大型双臂工业机器人。通过采用多臂协同技术,使得航空大尺度产品制造可以采用常规工业机器人系统,从而降低制造、装配单元的成本和周期,并具有柔性。因此,近年来该技术受到国际众多科研机构的高度重视,国际知名机器人制造商 ABB、KUKA、YASKAWA 等也为此纷纷开展相关装备的研制。

### 3 末端伺服工业机器人

航空航天产品制造、装配过程中最至关重要的就是产品加工精度,特别是大尺度部件制造的绝对定位精度和路径精度。目前工业机器人的重复定位精度较高而绝对定位精度较低,无法满足飞机数字化装配中绝对定位精度低于 0.5 mm 的要求<sup>[6]</sup>。工业机器人通常采用开链式串联关节构型,由于受到负载、重力、环境温度、机器人本身的制造精度、插补算法以及加工过程中的振颤等因素影响,末端执行器相对于固定基座坐标系的多个连杆均会产生误差积累,而且零部件、工装夹具与机器人基座间因加工受力变形也会产生误差。通过提高关节定位精度和减小连杆变形的的方法在改善末端定位精度方面的作用非常有限(图 7)。因此工业机器人需要通过精确引导末端执行器实现运动轨迹的伺服控制。国内外目前引导机器人末端执行器定位的方式主要有 3 种:

(1) 采用光学测量仪器,如激光跟踪仪, iGPS;

(2) 采用立体视觉测量系统,如双目或多目视觉;

(3) 采用力觉检测系统,如加速度计等。

Premium 航空技术公司在 A350 飞机碳纤维增强复合材料机身制造过程中,采用激光跟踪仪引导两台工业机器人协同完成桁条粘贴任务,其

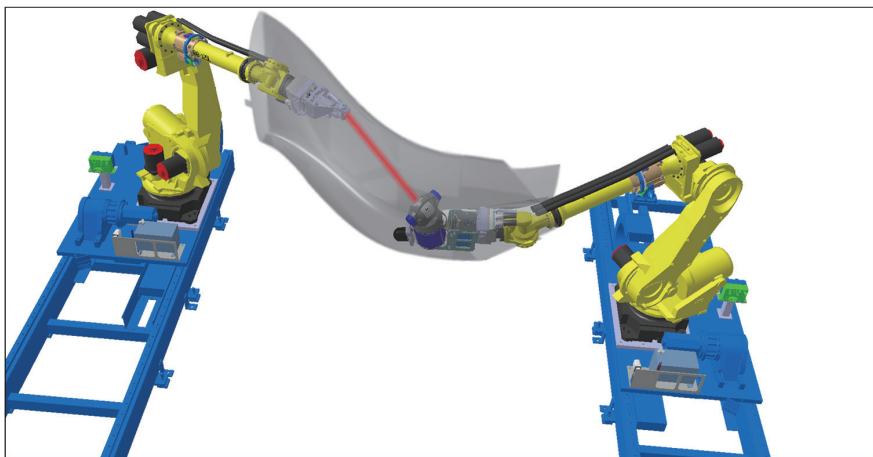


图7 采用激光跟踪仪引导机器人准确定位

18m长桁条的周向公差可达 $\pm 0.3$  mm。FANUC America公司采用集成多摄像头、可远程定位的iRVision视觉引导系统、安装加速度计的学习振动控制系统(LVC)以及次级编码器,共同作用构建了高精度解决方案。不仅通过数据修正使末端执行器的振动降到最小,而且可以对不同位置上的同型工件进行相同的加工过程。既提高了机器人的生产效率,又节约了地面作业空间。

除了采用高精度的测量仪器外,建立定位误差模型和补偿算法也是提高定位精度的重要手段。德国宝捷自动化公司开发的包含校准工艺和补偿方法的组合包在不使用外部测量仪器的情况下,让一台标准工业机器人的绝对定位精度达到 $\pm 0.3$ mm。国内北京航空航天大学、浙江大学、南京航空航天大学等高校的研究和实践表明,采用末端伺服工业机器人是解决当前航空产品制造绝对定位精度的重要手段。

#### 4 灵巧关节工业机器人

航空产品通常结构复杂、布局紧凑、而且洁净度要求高,能够进行装配、检测以及清理的工作空间非常有限,因此人工操作难度大,劳动强度大,效率低。常规的工业机器人系统关节尺寸大无法在狭小空间完成这类作业。仿象鼻、章鱼须或蛇等柔性多节结构的灵巧关节工业机器人应运而生。英国OC Robotics公司为空中客车英国公司开发了系列蛇形臂机器人(图8),能够钻入机翼内部进行检测、紧固和密封。

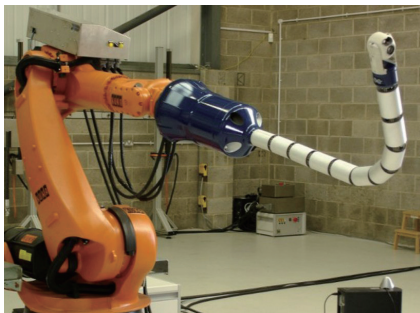


图8 OC Robotics公司的蛇形臂机器人

航空大部件产品制造、装配、维修过程有时需要运用敲击振动过程(图7),比如铆接,有时又必须避免与作业环境或人发生碰撞。传统的刚性关节工业机器人由于受传感器测量带宽和计算机速度的限制,导致其不能对快速冲击及时响应<sup>[7]</sup>,难以适应需要瞬间加速或较大力矩的场合,并且工作空间需要封闭以保证安全性。为此,工业机器人的灵巧性还体现在采用柔性关节,其内部含有弹性环节,通过测量关节的输出力矩构成力矩反馈,从而获得比传统关节更高的力控制精度与稳定性。弹性环节还可以存储能量,在瞬间释放时可以产生较大的力矩。采用柔性关节的工业机器人具有安全性,能够与人直接交互,可以实现作业现场的开放性和移动性。德国宇航中心DLR、美国Meka Robotics公司、瑞典ABB公司等机构在柔性关节领域开展了深入研究,部分产品正逐渐投入市场。

### 亟需解决的关键技术

#### 1 工业机器人末端执行器精确伺服

串联结构工业机器人通常采用谐波减速器,关节刚性较差,为提高定位精度首先需要对机器人的关节刚度、位置误差、温度引起的变形等进行参数辨识,获得误差模型或误差矩阵。其次,通过精度补偿算法对末端执行器的定位提供伺服修正,其补偿方式包括离线和在线两种方式。离线方式通过预先测量等手段,将空间网格误差、刚度误差、温度误差等补偿数据预置在控制算法中;在线方式借助多种实时测量手段,比如激光跟踪仪、立体视觉系统、力或加速度计等传感器对末端位置进行闭环控制。此外,在制造过程中,大尺度部件的振颤或者移动平台的震动对机器人加工精度和质量的影响也不容忽视。为此,工业机器人关节刚度、位置误差、温度补偿的快速高效辨

识、光视觉多传感器在线融合空间配置技术、振颤动态抑制方法以及定位精度补偿算法是解决工业机器人末端执行器精确伺服的关键技术。

#### 2 冗余自由度机器人运动规划与力/位控制

移动式工业机器人和紧耦合多臂协同工业机器人均属于具有冗余自由度的机器人系统。对于移动式工业机器人,既需要对移动部分进行定位和局部运动轨迹规划,又需要对工业机器人末端轨迹进行精确规划。在喷涂、检测等动态应用中,需要移动式工业机器人上下部分实时规划、协同运动。在制孔、铆接等力/位伺服应用中,由于移动部分与地面没有锚接,机器人在单边压力操作过程中的力反馈控制成为关键。多机器人系统自由度高度冗余,既引起运动学上的不确定性(不同位姿机器人的操作对象处于同一空间位姿)又引起动力学上的不确定性(操作同一对象的各个机器人末端作用力并不唯一)。单机器人系统的控制方式无法直接应用于冗余自由度机器人的运动协调,必须深入分析多机器人系统的运动学和动力学特性,建立能够描述整个协调系统动力学特性的数学模型,才能实现精确的协调运动控制。因此,冗余自由度机器人运动学建模和多种约束条件下的广义坐标求解、机器人载荷分配、闭链内力协调与关节驱动力优化、与环境动态交互的逆动力学控制以及操作细长、薄壁柔性负载的控制是冗余自由度机器人运动规划和力/位控制面临的关键技术。

#### 3 工业机器人灵巧结构与柔性关节

包含法向检测、切削清理、刀具润滑以及属具快换等装置的末端执行器通常体积和重量大。为此串联结构工业机器人各杆段的体积、功耗也相应逐渐增大,为了获得较大的刚度和自振频率、降低非线性干扰,工业机器人往往设计有臂杆平

衡机构,因此整个机器人制造系统体积大、结构重、功耗大、负载-自重比低,在工装上能够布置的空间有限,不利于多机器人协作和提高效率。而目前面向航空复杂、狭窄结构部件装配、检测的串联多关节式仿生机械臂还有待进一步提高负载能力和刚性。另外,被加工复合材料或薄壁部件易变形,在制造过程中为防止接触力过大而导致机器人或被加工部件受损,机器人与部件之间需要采取柔顺控制。随着制造环境的逐渐开放,机器人伴随人工作业的方式成为趋势,人机交互过程中的安全性也成为重要问题。因而机器人的碰撞检测必不可少。鉴于这些需求,工业机器人必须从结构、驱动上加强设计优化,降低功耗、提高负载/自重比;关节必须模块化集成,充分考虑碰撞力检测和主动柔顺控制。为此,新型机器人结构设计、轻量模块化结构设计、包含弹性环节的柔性关节设计和控制、新型碰撞检测传感器设计与配置、智能避碰实时检测与快速响应等成为面向航空航天制造工业机器人的关键技术。

#### 4 机器人全向移动平台

移动式平台是工业机器人提高柔性制造能力的重要基础。除此之外,移动式平台本身作为一种半自主机器人,在航空航天制造过程的总装对接和工序流转中同样也发挥着重要作用。它可以替代大尺度产品运输、装配中通常使用的各种导轨、气垫和轮式专用运输架车,成为航空航天制造领域载重运输平台的新趋势。KUKA公司的全向移动平台已用于Premium AEROTEC公司的机身成型模具运输。德国CFT公司研制的MC-Drive TP 200、MC-Drive TP 60、MC-drive PT 200-WHT等全向移动平台已用于英、美、德等国家的机身、机翼运输和引擎加工。这类平台通常需要满足以下技术要求:

(1)平面全向移动能力,包括任意方向平移和任意定点回转,作业空间要求低;

(2)承载能力和支撑尺度大,能够满足大型部件的运输和作业工况下的稳定支撑;

(3)具有三维调姿、定位能力且调节精度高(位置精度 $\pm 1\text{mm}$ ,俯仰、偏航调整精度优于 $0.02^\circ$ ,水平度调整精度优于 $0.2\text{mm/m}$ );

(4)运动速度快,调速范围宽,流转效率高;

(5)能源、控制、执行等系统集成度高,结构紧凑;

(6)拓展性好,能够承载多种作业装备;

(7)操控简便,自动化程度高,减少人工干预。

为此,机器人全向移动平台在结构方面需要解决全向轮、车架的重载结构设计,柔性支撑结构设计,通用化结构设计以及移动平台的运动稳定性。在控制方面应考虑液压或电机驱动的全向轮牵引能力设计与控制,考虑紧凑性、维护性的控制、能源与执行系统模块化设计以及作业平台的高精密定位与伺服控制。全向移动平台还可能与现有的气垫式、电磁式、导轨式等移动形式构成复合式移动平台,以满足复杂的应用需要。除此之外,满足行业标准和规范的工业现场电、液、气辅助装置的配套设施规划技术也是全向移动平台设计中必不可少的内容。

#### 5 工业机器人智能工艺规划

航空航天复杂装备一方面向小型化、轻量化和精密化方向发展,其填充密度和装配精度要求高、装配难度大,通常采用虚拟装配技术提高一次性成功率和装配质量。另一方面,航空航天产品多品种、小批量特征要求制造生产线具备柔性制造能力。一台工业机器人要能够配备不同规格的末端执行器,对不同型号产品进行相似的制造和装配作业。采用工

业机器人进行柔性自动化装配时,对装配顺序、装配路径、末端执行器选配应进行工艺规划,并通过离线编程实现干涉检验和指令生成。此外,航空航天零部件的配合关系多样、尺寸链接复杂。在离线编程的基础上,必须结合前道生产过程实时信息,对后续加工过程进行同步调整。为此,面向航空航天复杂装备的柔性生产,工业机器人需要解决末端执行器快换装置、离线编程、柔性装配工艺规划和加工过程同步检测等技术的开发。

#### 结束语

面对航空航天制造领域大尺度、高精度、多品种、小批量的生产特点,提高质量、降低成本、快速反应是航空航天制造企业应对市场竞争和行业发展的的重要手段。工业机器人在企业生产模式转型升级、提升装备先进制造能力方面将发挥着重要角色。当前新型材料、高精加工、复杂装配对工业机器人的技术应用、制造理念和管理规划提出了新的要求,需要制造企业和机器人研发团队密切合作,针对应用中面临的各项关键技术探索突破,从而实现工业机器人技术在航空航天制造领域不断创新。

#### 参考文献

- [1] 马娟荣. 航天生产线采用工业机器人的发展机遇. 北京: 中国航天报, 2013-07-23 (3).
- [2] M.A.Ren é Maresch. Factories of the future: Mobile manipulators for aerospace production. 2013-04-29[2013-09-20].
- [3] 赵杰. 我国工业机器人发展现状与面临的挑战. 航空制造技术, 2012, 12, 26-29.
- [4] 邱铁成, 张满, 张立伟, 等. 机器人在卫星舱板装配中的应用研究. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 579-585.
- [5] 甘亚辉, 戴先中. 多机械臂协调控制研究综述. 控制与决策, 2013, 28(3): 321-333.
- [6] 龚星如, 沈建新, 田威, 等. 工业机器人的绝对定位误差模型及其补偿算法. 南京航空航天大学学报, 2012 (44): 60-64.
- [7] 黄远灿. 柔性一体化关节及4自由度仿人软机械臂. 机器人技术及应用, 2013 (2): 39-40. (责编 日午)