

# 机器人自动制孔技术在飞机装配中的应用

Application of Robot Automatic Drilling Technology in Aircraft Assembly

中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 刘 军



刘 军

中航工业哈飞工程技术部装配工艺科副主任工艺师,高级工程师。主要从事直升机及大型客机的数字化和自动化铆接装配工艺工作,发表论文6篇,申请专利30余项。

飞机自动钻铆技术是当今世界飞机自动化装配的先进技术之一,具有钻孔、铆接质量好,生产效率高,劳动条件好,操作者容易掌握等特点<sup>[1]</sup>。由于近年来机器人技术的迅猛发展,加之其投资降低、自动化程度高、工作性能稳定、可达性好等优势,在航空制造过程中正得到越来越多的应用。以波音787、A340、A380、F-22、F-35等为代表的新型

采用机器人进行飞机结构件自动化钻铆工艺过程可以提高制孔、铆接质量,从而提高飞机制造装备的柔性和自动化程度,并保证飞机使用寿命,最终提高飞机制造的总体水平。采用机器人进行飞机结构件自动化制孔在我国航空制造领域的应用还不成熟,特别对于机器人自动制孔应用软件研究及制孔模拟仿真还没有完全掌握,因此对机器人自动制孔技术的研究至关重要。

飞机,在其制造过程中大量采用机器人进行自动化装配及性能的检测与测试工作,从而极大地提高了飞机的生产效率和质量可靠性。据国外统计资料表明,采用机器人对飞机部件进行钻孔加工,单台机器人每年可完成100万个紧固件的高质量制孔<sup>[2]</sup>。采用机器人进行飞机结构件自动化钻铆工艺过程可以提高制孔、铆接质量,从而提高飞机制造装备的柔性和自动化程度,并保证飞机使用寿命,最终提高飞机制造的总体水平<sup>[3]</sup>。采用机器人进行飞机结构件自动化制孔在我国航空制造领域的应用还不成熟,特别对于机器人自动制孔应用软件研究及制孔模拟仿真还没有完全掌握,因此对机器人自动制孔技

术的研究至关重要。

## 机器人自动制孔系统组成

机器人自动制孔系统主要由一套机器人自动加工系统、一个末端执行器和一套完整的离线编程软件组成。

### 1 工业机器人自动加工系统

工业机器人自动加工系统由X轴导轨系统(或MRP外围设备)、工业机器人、机器人控制柜、机器人控制系统、真空除屑系统、示教器、刀盘装置、涂胶系统、送钉系统等组成,由机器人控制系统进行控制和管理。机器人控制系统安装在机器人控制柜内,包括管理计算机、现场网络及控制器。在管理计算机内安装有

WindowsNT 或 XP 系统软件、TwinCat NC/PTP 开发平台、Cell Control<sup>®</sup> 等运行软件,使系统具有权限选择、示教、计算机数控、实时调整、操作管理、信息显示、数据管理、OPC 服务器、精度补偿、诊断、防护、防误操作等功能。现场网络及控制器由机器人控制器、伺服控制器、可编程控制器、编码器、变送器以及工业以太网、现场总线等组成,具有通信、保护、控制、拓展等功能。通过工业机器人自动加工系统,可以控制工业机器人的姿态,并完成真空除屑、自动换刀、送胶、送钉等工作。

## 2 末端执行器

末端执行器由高速电主轴、主轴进给装置、压力脚、法向找正装置、基准法向找正装置、刀具盒及刀具、刀具识别装置、润滑装置、孔位标识装置、质量检测系统、视觉系统、抽铆装置等组成。设备中,电主轴负责为钻孔刀具提供扭矩,主轴进给装置由在线伺服电机控制用于保证钻孔进给位置和速度,压力脚用于加工时产品的压紧,法向传感器的4个激光距离传感器用于系统加工前的孔位法矢方向找正,加工基准找正装置的激光传感器可对于产品加工基准(孔、边、临时紧固件)特征进行扫描,自动提取几何特征,刀具判断装置的激光光帘传感器用于检测和判断刀具是否折断及破损,润滑装置/喷雾发生器在对铝合金材料进行钻孔时对刀具进行冷却和润滑,孔位标识装置可在钻孔前以试钻模式对所有孔位进行标识。

## 3 离线编程系统软件(OLPS)

由 DELMIA Robotics V5 (WL2 +OLP)、FasTIP、PIK (BA-OLPS) 等软件组成。其中, DELMIA Robotics V5 WL2 (机器人模拟)+OLP (机器人离线编程)用于建立起整个工作单元空间的位置关系等,定义机器人的任务,进行仿真以及碰撞分析; FasTIP 是 CENIT 公司基于 DELMIA

Robotics V5 (WL2 +OLP) 软件所做的钻孔和铆接离线编程解决方案; PIK (BA-OLPS) 是针对买方定制开发的 BA-OLPS 的离线编程系统用户化软件,包括机器人单元的 CAD 数模。

离线编程系统支持 CATIA V5R18 产品和夹具数模,通过给定的起始点和结束点,系统推荐一条加工路径,计算机数控程序编制及后台处理。根据钻铆位置和规划路径生成可执行计算机数控程序。支持 CATIA V5R18 环境建立的钻孔加工头/铆接加工头、机器人及扩展导轨、夹具等精确数模,自动提取加工的技术基准(孔、边)特征;自动提取产品曲率特征和孔中心坐标点,生成孔的法向位置,对钻孔加工需要的工艺参数进行管理,如钻头、钻速、钻头进给,材料信息、润滑、产品基准、镗窝等。通过提取的或者输入的几何参数信息以及钻铆件的其他信息,自动选择刀具,实现离线编程程序与机器人指令代码的转换,可虚拟运行离线编程所生成的程序,自动完成机器人加工运动仿真模拟以及干涉检查等,对机器人在工作区间进行路径和姿态规划,根据仿真结果进行工艺过程与工艺路线优化。

## 机器人自动制孔精度的控制

### 1 机器人位置精度

机器人的位置精度指标包括绝对位置精度和重复定位精度,绝对定位精度是整个系统相对产品总体大小的精度,重复定位精度是系统对同一个位置的重复公差,绝对位置精度和重复位置精度指标是在没有任何附加的激光跟踪仪和其他测量系统的辅助的情况下测量的,一般的工业机器人具有较高的重复定位精度,但其绝对定位精度较差,重复定位精度达到 0.1mm 的机器人,其绝对定位精度误差可能达到 2~3mm<sup>[4]</sup>。

由于机器人的绝对定位精度公

差较大,仅仅依靠机器人自身的位置精度不能满足飞机制造的要求,必须通过其他的辅助测量设备进行位置精度补偿才能使其满足飞机制孔位置精度的要求。

### 2 工装及产品位置精度

由于机器人的位置精度误差较大,在机器人自动制孔过程中,无法依靠机器人自身的位置精度控制进行自动制孔,必须通过辅助测量设备的补偿,控制产品(或工装)与机器人自动制孔系统之间的位置精度,所以无论采用机器人移动的工艺方案,还是采用工装移动的工艺方案,对机器人和工装之间相对位置高精度要求是没有实际意义的,因此在目前飞机装配生产线制造技术中,对于产品(或工装)与机器人制孔系统之间位置的控制没有严格的要求。

但是,由于机器人有一定的工作包线范围,在机器人的最优工作姿态时机器人的位置精度控制及钻孔精度都是最佳状态,因此在工程设计阶段,将对机器人工作姿态进行详细的可达性研究,以审查机器人运行角度、重复定位精度、间隙角等,分析机器人制孔时的可达区域以及不开敞区域。通常,将采用虚拟仿真手段以识别潜在的问题,并制定解决方案,确定型产品或(工装)合适的定位位置。

### 3 机器人自动制孔精度控制

由于机器人存在绝对位置精度和重复定位精度误差,那么在自动制孔过程中就会出现理论制孔位置与实际制孔位置的偏差。为了使机器人自动制孔精度满足飞机钻孔位置精度要求,主要是通过对机器人的制孔位置进行实时的精度补偿来实现的。目前,机器人精度补偿有两种方法:一种是增加末端反馈检测,实现全闭环控制;另一种是通过标定的方法来提高机器人的绝对定位精度<sup>[4]</sup>。本文将重点关注末端反馈的全闭环控制。

末端反馈的全闭环控制补偿方法是基于末端执行器视觉系统的制孔精度补偿,是在末端执行器上加装视觉和激光距离测量传感器。在实时测量和补偿过程中,末端执行器上的视觉系统通过测量实际型架或产品上预设的定位孔或基准紧固件(距离约在 1000mm × 1000mm 范围内,视产品外形情况可大可小)进行全局定位以建立大坐标系,将机器人参考平面同步到产品(或工装)参考平面,相对于产品数模产生新的坐标系,此时机器人刀尖的位置坐标相对于实际产品外形每一坐标点进行实时修整,保证机器人刀尖与实际外形每一对应点的偏差尽量小,偏差越小,对下一步局部定位越有利,而且 CPU 的计算时间就越短,制孔效率亦越高,此时机器人刀尖相对于实际产品能达到的定位精度约为 ±0.5mm 左右,但此时仍不能满足制孔的精度要求,真正需要关注的是孔距(边距或排距)的精度。

在机器人按照产品(或工装)的定位孔或基准紧固件进行全局定位后,就需要通过引用预设的大约 10%~20% 距离约在 500mm × 500mm (视产品外形情况可大可小)紧固件(永久或临时)定位孔或基准紧固件,在大坐标系的基础上进行局部定位,以建立小坐标系,机器人再进行实时局部补偿(图 1),因此这些参考孔或紧固件将直接影响系统的精度,因此必须精确定位。

建立小坐标系后的实时局部补偿过程中,系统通过找到理论上的点,并测量实际的位置,测量数据将被用来最佳拟合计算,并确定实际的 TCP 位置(图 2),机器人位置可以由软件进行实时修正,该软件通过分析目标位置信息,产生合适的偏移量,使得机器人获得所需的精度,机器人刀尖的位置坐标相对于实际产品外形对应坐标点的偏差进一步缩小。

通过全局及局部的实时精度补偿,机器人制孔精度可以达到 ±0.3mm 的精度要求,这一工艺过程将获得产品在局部区域内所需的精度,能够满足产品孔距(边距或排距)。通常网格越小(如 200mm × 200mm),作业时间越长,生产效率越低,但位置精度越高。

### 机器人自动制孔工艺过程

机器人制孔工艺流程设计主要是基于 DELMIA-FASTIP 机器人制孔方案,机器人制孔软件主要由 DELMIA Robotics V5 (WL2 +OLP)、FasTIP、PIK (BA-OLPS)或相当软件组成;利用 DELMIA Robotics V5 (WL2 机器人模拟 +OLP 机器人离线编程)软件的主要用途是建立起整个工作单元空间的位置关系,包括机器人自动加工系统、定位工装、产品零件、几何坐标工装,并且可以定义机器人的任务,进行仿真以及碰撞分

析。利用 FasTIP 软件制定钻孔离线编程解决方案。利用 PIK (BA-OLPS) 离线编程系统用户化软件及机器人单元的 CAD 数模(简化的 CGR 模型),进行整体的运动过程仿真分析。

基于上述应用软件的功能,在 Catia V5 环境下,对机器人建立数字化模型,利用 DELMIA 的 DPM 建立工艺过程仿真环境,利用 DELMIAIGRIP 模块对制孔的过程进行规划、仿真及离线编程。通过零件数模提取点位信息,采用 FASTIP 软件自动创建点的加工序列,补充中间点,根据加工要求创建机器人路径信息和加工程序,对机器人路径进行优化后,进行机器人运动仿真。添加机器人约束的信号量和其他信号量,进行干涉及碰撞检查。进行完整加工过程的方案后,生成机器人离线程序并将离线程序转化为机器人格式的代码,进行机器人的离线编程仿真及后置处理。

#### 1 仿真环境的创建

装配仿真过程中,主要应用 DELMIA 的 DPE (数字装配工艺设计过程)及 DPM (数字工艺验证与装配过程仿真)模块。前者是产品资源规划应用的平台,利用在产品初步阶段产生的数字样机或

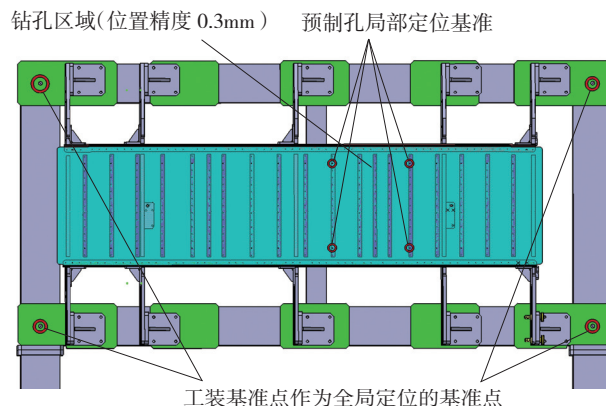


图1 产品或工装上的典型目标模式

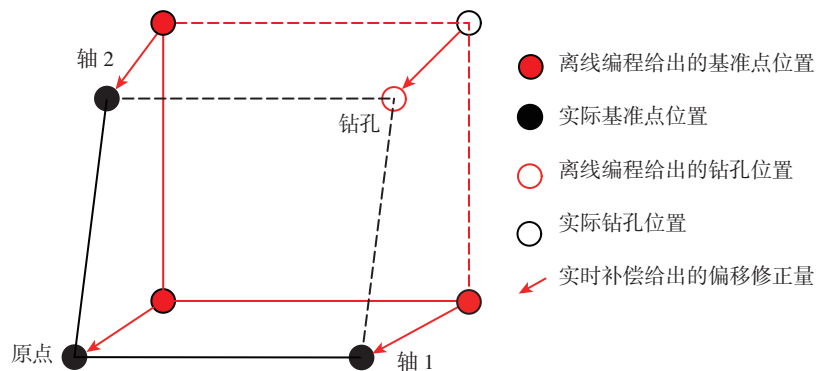


图2 最佳钻孔位置拟合计算示意图

EBOM 数据进行产品分析及工艺流程定义、制定总工艺设计计划、工艺路线制定、工时分析、车间设施布局及物流仿真。DPM 为工艺细节规划和验证应用的环境。二者通过 PPR Hub 数据库共享数据。在这里选用 DELMIA DPM 模块建立 MRP 仿真布局方案。基于 DELMIA 将机器人 6 轴机械臂、末端执行器等进行整合,形成完整的机器人仿真模型,可在 DELMIA 里直接作为任务机器人进行调用。

## 2 创建机器人路径点信息

CENIT FASTTIP 模块在铆接和多层制孔等应用场合提供了规划、编程和验证新工件程序的增强功能以及强大的上传模块实现对现有部件程序的逆向工程。在机器人自动制孔工艺过程中,机器人工具点 TCP 的路径规划关系到制孔位的准确程度,制孔点位的路径选择规划尤为关键。利用 CENIT 软件的 FASTIP 模块,通过计算零件表面特征,自动生成路径点的矢量方向,提取工件中点位信息,生成加工路径点。

## 3 自动生成加工序列

基于 CENIT FASTIP,根据设定的序列规则将选定的路径点排序,生成加工序列在点序列生成的过程中,根据经验选取若干个典型的点序列规划规则,得到多个点序列规划,通过对比,选择效率最高的一组,根据机器人在空位上的具体的加工需求,指定接近/回撤距离。

## 4 机器人路径点优化

根据 CENIT FASTIP 提取的点位,机器人末端执行器 TCP 点沿着所规划的路径运动,点位的矢量方向要与机器人工具点 TCP 矢量方向吻合。受机器人手臂关节自由度的限制,TCP 在 2 点之间运动经常会遇到不可到达的问题、或理论上与工件表面发生碰撞干涉现象,或者完成制孔动作后回撤动作。对于这些问题需要调整路径点的矢量方向或增加过

度点控制 TCP 可达区域,对于机器人路径点优化我们前期已经积累一定的经验,这也是机器人离线调试中的关键技术。

## 5 机器人点位信号设置

为了控制机器人运动及防止运动过程中多个设备发生干涉,需设置机器人信号,控制机器人末端执行器 TCP 运动的起始及终止条件。根据工件工装布局的复杂情况,在某些点位设置信号,与机器人之间通信,告知点位可达与非可达,来有效控制机器人手臂的运动范围,从而避免与工件设备碰撞。

## 6 机器人运动过程仿真

通过 Delmia 的 OLP 模块,进行整体的运动过程仿真,观察机器人在不同工位工作情况,由于机器人采用 6 轴串联的结构,受到关节臂转动范围的影响,在某些空间上相邻点位的运动过程中,机器人手臂将会进行大幅度的转动或摆动,甚至会超过机器人关节转动角度范围。在机器人运动仿真过程中,通过 Simulation Analysis Tool 可以发现这些问题,通过手动修改点序列的顺序,将这些相邻的点,划分到不同的加工路径上,避免在连续路径的点位加工中出现此类现象。

## 7 生成机器人离线程序

模拟程序是指在虚拟控制器上运行程序,如同在真实的控制器上运行一样,它是最完整的测试。借助该测试,可以了解机器人如何通过事件和 I/O 信号与外部设备进行交互。通过定制程序进行机器人离线程序后处理,将标准程序代码转换为符合机器人需求的离线程序。

通过机器人自动制孔仿真分析,可以找到机器人制孔的路径分析和碰撞检查的仿真过程中,需要有长期的点位信号设置和路径优化经验积累才能实现最优结果,而国内机器人自动制孔技术应用还不成熟,只能在实践中逐渐尝试,随着机器人自动制

孔技术的逐渐应用和开展,此项技术也必将被国内航空制造业所掌握,大大提升我们的航空制造技术水平。

## 8 产品的自动制孔

为了使产品装配的每个环节都能够很好地适应自动钻孔系统,对产品的铆接装配流程大致划分如下:(1)产品组件在工装上的装配和定位;(2)预先钻制 15% 的临时紧固件孔,进行结构的固定和加强;(3)对产品上剩余 85% 的紧固件进行自动钻孔、测量、涂胶、送钉并铆接;(4)拆卸 15% 的临时紧固件,然后进行自动钻孔、测量、涂胶、送钉并铆接;(5)进行数字化检测和测量。

## 结束语

现代大型飞机设计中,对飞机的外形准确度要求很高,而且机体结构大多采用整体壁板结构,机身结构要求寿命周期长,因此对机身结构的制孔质量有较高的要求。同时,随着复合材料技术的发展,飞机制造中复合材料的应用比例逐渐提高,由于复合材料在制孔技术要求的特殊性,使得飞机自动化制孔技术在国外得以飞速发展。特别是通过引进国外先进的自动制孔系统及铆接生产线,可以大力开展对国外先进飞机自动化制孔技术的研究,学习和积累国外先进技术及工艺方法,并结合大型飞机的研制的实践,必将大大提高我国的飞机装配紧固件连接技术。

## 参考文献

- [1] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用. 航空制造技术, 2005, 48(6): 50-54.
- [2] 王崧, 刘浩, 田威, 等. 面向飞机自动化装配的机器人工作姿态规划. 中国制造业信息化, 2012, 41(13): 50-54.
- [3] 刘长毅. 飞机自动化装配制孔动力学研究. 航空制造技术, 2012(16): 26-29.
- [4] 周炜, 廖文和, 田威, 等. 面向飞机自动化装配的机器人空间网格精度补偿方法研究. 中国机械工程, 2012, 23(19): 2306-2311.

(责编 深蓝)