

# 基于工业机器人的飞机柔性装配技术

沈建新 田 威

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:**研究了基于工业机器人的飞机柔性装配技术,着重讨论了机器人精度补偿、末端执行器设计、法线检测与找正、系统控制、离线编程等关键技术。通过在小翼部件加工中的应用,达到了孔位精度 $< \pm 0.5$  mm、法向精度 $< \pm 0.5^\circ$ 等关键技术指标。结果表明,对于特定应用对象采用机器人技术进行飞机部件自动装配为一个理想、低成本的解决方案,随着当今工业机器人性能不断增强,配以末端执行器和相关的补偿系统,在航空工业作为装配平台是可行的。

**关键词:**飞机装配;工业机器人;精度补偿;法线检测;多功能末端执行器;离线编程

**中图分类号:**TH242. 2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)02-0181-09

## Aircraft Flexible Assembly Technology Based on Industrial Robots

Shen Jianxin, Tian Wei

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

**Abstract:** The industrial robot flexible assembly technology for the plane drilling and riveting is presented. The key technologies are researched including accuracy compensation of multi-joint robot, multi-function end effector (MFEE), workpiece surface normal measurement and alignment, system control technology, and off-line programming etc. To qualify this for production on the small wing parts assemblies, the system produces each hole to a diameter tolerance of  $\pm 0.5$  mm and a normality tolerance of  $\pm 0.5^\circ$ . Results show that automated assembly of aircraft structures using robotic technology can be an ideal, low cost and effective solution in the appropriate application. With the increased functionality available in today's off-the-shelf industrial robots, teamed with the multifunction end effector and software compensation, their use as assembly platform in the aerospace industry is fast becoming viable.

**Key words:** aircraft assembly; industrial robot; accuracy compensation; normal measurement; MFEE; off-line programming

近年来,飞机制造业对飞机装配技术提出了高质量、高效率、低成本,并且能适应小批量、多型号产品的要求,对飞机自动化柔性装配技术的需求也越来越高。迄今为止,飞机装配技术经历了从手工装配、半机械/半自动化装配到自动化装配的发展

历程,市场竞争及相关技术的不断发展,推动着装配技术不断向更高水平演进,目前快速发展的柔性装配将自动化装配技术推向了一个新的高度<sup>[1-4]</sup>。

国外飞机自动化装配技术从自动钻铆系统向柔性装配系统方向发展,柔性装配系统主要由柔性

**基金项目:**江苏省科技支撑计划(BE2102171)资助项目;航空科学基金(2013ZE52067)资助项目。

**收稿日期:**2014-01-15;**修订日期:**2014-02-15

**作者简介:**沈建新,男,1969年11月生,教授,博士生导师,享受政府特殊津贴专家。主要研究方向:数字化设计制造、飞机装配、数字化医疗装备。发表论文70余篇,申请发明专利10多件,曾获国家级科技进步、省部级科技进步奖、霍英东青年教师奖等,入选“新世纪百千万人才工程”、江苏省“333人才工程”等。

**通信作者:**沈建新, E-mail: cadatc@nuaa.edu.cn。

装配工装、模块化加工单元、数控定位系统、自动送料系统和数字化检测系统等组成的,机器人柔性装配系统成为快速发展方向之一。2002年,EI公司(Electroimpact Inc.)率先采用机器人技术(ONCE robotic drilling system)应用于波音FA-18E/F超级大黄蜂(Boeing F/A-18E/F Super Hornet)的机翼后缘襟翼,进行制孔、镗孔和测量紧固件孔等作业<sup>[5]</sup>。2007年,位于澳大利亚的波音子公司霍克公司,采用Kuka 360-2标准关节型机器人组成的钻孔系统应用于波音737家族的副翼,5.5 h内在预装型架上能够完成多达750孔的钻孔、镗孔以及后缘蒙皮裁剪等副翼任务,叠层材料包括碳纤维强化塑料(Carbon fiber reinforced plastic, CFRP)、铝、钛、不锈钢等<sup>[6]</sup>。2008年,波音787的移动后缘装配中采用了机器人集成装配技术,集成了钻孔、检测、紧固功能,不需将组件卸下去毛刺、清洗、密封,这种新型的用于787机器人系统具有实现多种不同装配的柔性单元,在一个月生产14组、每组多达20 000个紧固件的移动后缘,每月实现多达28万个具有严格标准的钻孔、镗孔、定位、埋头紧固件的任务,大大提高了装配效率<sup>[7]</sup>。2010年,欧直公司采用标准关节机器人系统对飞机货舱门结构的自动钻铆,应用宝捷公司的RACe系统——即机器人装配单元将关键的柔性性能与自动压铆工艺相结合,在货舱门内部结构上安装1 200个实心铆钉<sup>[8]</sup>。采用六轴机器人配以伺服控制的直线轴,系统在西门子840Ds1 CNC控制下,2011年美国沃特飞机工业公司的Triumph Aerostructures分厂进行波音737内侧襟翼的钻孔和铣削,实现了每组内侧襟翼2 150个孔(每月实现15组),制孔直径从4.8~9.5 mm,钻孔层叠有铝、钛、CFRP等的复合<sup>[9]</sup>。2013年Spirit AeroSystems公司将机器人系统用于高温、高压、高动态精度要求下的碳纤维短舱板生产<sup>[10]</sup>。

与国外先进水平相比,目前中国在飞机装配中,人工装配仍然占据着主要地位,装配设备陈旧、落后,制孔质量、连接质量难以满足新型飞机对高性能的要求,装配技术已成为中国飞机制造过程中最薄弱的环节,北京航空制造工程研究所、北京航空航天大学、浙江大学、南京航空航天大学等也对基于机器人的飞机装配技术进行了相关的研究,取得了一定进展<sup>[11-17]</sup>。

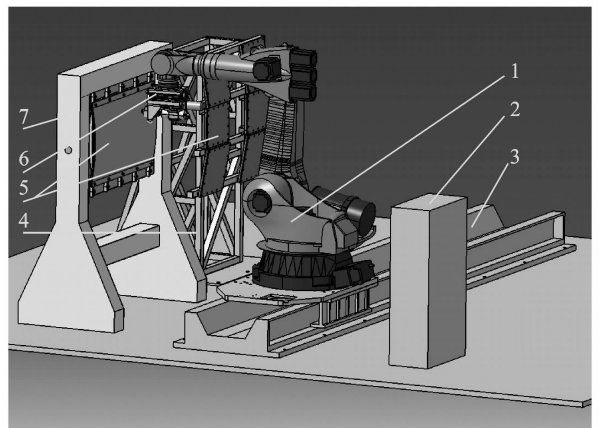
论文针对基于机器人柔性装配的需求,提出了系统总体方案,研究了其中的关键技术,并通过实验和对小翼部件自动钻孔的实际应用,达到了相关要求。

## 1 基于工业机器人的飞机柔性装配系统

基于工业机器人的飞机柔性装配系统是利用工业机器人的灵活性,配置特定功能的末端执行器,在系统自动化控制下,实现钻孔、铆接等装配任务。其工作对象为飞机的部装、总装等,根据装配对象的不同,可以分为副翼、襟翼、机翼、机身、平尾、垂尾、方向舵等加工机器人;根据末端执行器实现功能不同,可分钻孔机器人、铆接机器人、钻铆一体机器人等。

基于工业机器人的飞机柔性装配系统示意图如图1所示,基于工业机器人的飞机柔性装配系统包括了工业机器人、末端执行器、地轨、工装等组成部分。该系统工控机根据离线编程系统生成的数控指令,由机器人带动末端执行器,到达指定的位置,由末端执行器实现钻孔或钻铆等功能。

系统功能包括:(1)精度补偿功能:利用编制好的精度补偿模块对离线编程中的程序进行修正,得到机器人实际工作指令。(2)法向找正功能:实时采集激光位移传感器的数据,计算工件表面法矢,经过法向精度补偿模块的处理,将得到的姿态值传送给机器人控制器,实现法向找正。(3)末端执行器控制:查看和修改末端执行器的工艺参数,控制末端执行器的加工流程。(4)连接通信功能:完成工控机与工业机器人的串口通信。(5)数控程序管理功能:负责系统数控指令的管理,包括加载、编辑和运行等。(6)系统监管功能:监控系统各组成硬件的状态,并提示出错信息。



注:1:机器人;2:控制柜;3:地轨;4:刚性工装;5:试件;6:末端执行器;7:柔性工装

图1 基于工业机器人的飞机柔性装配系统示意图  
Fig.1 Schematic diagram of aircraft assembly system based on industrial robots

## 2 机器人精度补偿技术

标准机器人的绝对定位精度只有大约  $\pm 2.5 \text{ mm}$ ,但有着良好的重复定位精度  $\pm 0.05 \text{ mm}$ 。典型的航空工业生产的要求是绝对定位精度要达到  $\pm 0.5 \text{ mm}$ ,重复精度达到  $\pm 0.05 \text{ mm}$ ,并在直角坐标系中进行离线编程。因此,提高工业机器人的绝对定位精度是将工业机器人广泛应用于航空制造业需要首先突破的关键技术。

本文提出一种基于工作空间权重度量的机器人精度补偿方法,通过以一定的步长将机器人的待工作空间划分为一系列的立方体网格,对于工作空间内任一目标定位点,通过包含它的最小立方体网格的 8 个顶点的绝对定位误差来估算出该点的定位误差,继而将该误差反向补偿到理论定位坐标上,从而实现对该点的定位精度补偿。

### 2.1 机器人精度补偿原理

基于工作空间权重度量的机器人精度补偿方法是采用在笛卡尔空间进行补偿,补偿模型如图 2 所示。图中  $p$  为机器人期望到达的位置,将它输入到机器人的控制器后,机器人控制器通过逆变换得到各个关节角所需转动的角度值  $\theta_i$ ,因为实际的机器人运动学参数值与其名义值之间存在着差异,因此当用逆解求得每个关节所需转动的角度值  $\theta_i$  来进行驱动时,机器人并未到达期望位置  $p$  而是到达了位置  $p + \Delta p$ 。因此,为了补偿由于几何参数误差带来的机器人绝对定位误差,通过一个附加算法给期望目标位置偏置  $-\Delta p'$ ,此时目标位置更改成  $p - \Delta p'$ 。机器人控制器通过求逆解得到各关节所需转动的角度是  $\theta_i - \Delta \theta_i$ ,用它来进行驱动时,预偏置的  $-\Delta p'$  与几何参数误差引起的定位偏差  $\Delta p$  相互抵消,从而提高机器人的绝对定位精度。

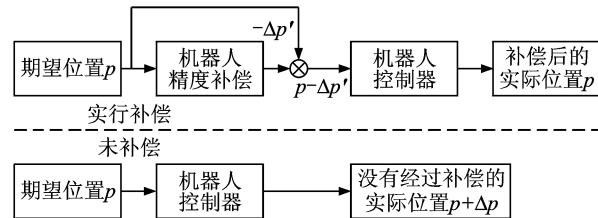


图 2 机器人精度补偿原理图

Fig. 2 Diagram of robot accuracy compensation principle

这种方法的优点在于,将整个机器人系统看成一个黑盒,综合系统各组成部分(包括机器人本体、轨道等因素),将所有的误差反映在  $-\Delta p'$  中,在机器人运动指令中的补偿此  $-\Delta p'$ ,不需要更改机器

人本体的内在控制系统,此时就可以得到设定的期望位置。

### 2.2 基于工作空间权重度量的机器人精度补偿方法

(1)根据机器人工作空间划分适当的网格

在机器人工作包络线范围内以一定步长对位于机器人机械零点位置前部的工作空间进行空间立体网格划分,如图 3 所示,沿着机器人坐标系 X 轴的方向可以依次划分出多层网格。

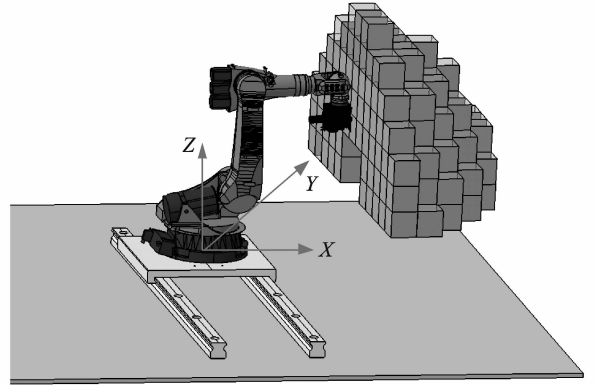


图 3 空间网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of space grid meshing

(2)对于每个立方体网格顶点设定权值

将机器人工作空间按给定步长均匀地进行空间网格划分后,对于划分的任一立方体网格如图 4 所示,其中立方体网格 8 个顶点  $K_i (i=1, 2, \dots, 8)$ ,其对应的理论定位坐标分别是  $(X_i, Y_i, Z_i)$ 。通过测量工具(如激光跟踪仪)实际测得的定位坐标是  $(X'_i, Y'_i, Z'_i)$ ,将理论值与实际值进行比较得到相应的绝对定位误差为  $(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i)$ 。

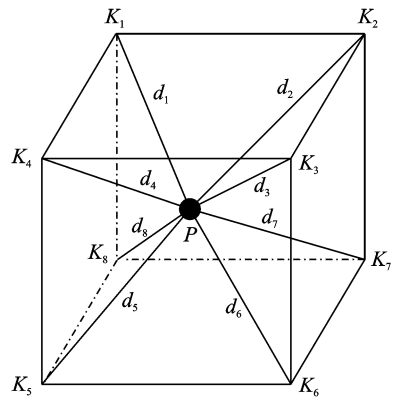


图 4 空间网格精度补偿原理图

Fig. 4 Space grid accuracy compensation principle diagram

(3)对于每个立方体网格顶点设定权值

对于立方体网格中的任一点  $P(X, Y, Z)$ , 它的绝对定位误差可以通过以下步骤预测:

**步骤 1** 计算网格 8 个顶点 ( $K_1 \sim K_8$ ) 分别对  $P(X, Y, Z)$  点的影响权值。首先, 分别计算网格 8 个顶点的实际定位坐标  $P$  点的理论定位坐标间的距离  $d_i$ , 接着依据距离的值大小反向求取权值  $q_i$ 。于是有

$$d_i = \sqrt{(X - X'_i)^2 + (Y - Y'_i)^2 + (Z - Z'_i)^2} \quad (1)$$

$$q_i = \frac{1}{d_i} \quad (2)$$

**步骤 2** 插值计算  $P$  点的误差。根据立体网格单元 8 个顶点对  $P$  点的影响权值的大小在坐标系 3 个方向上分别进行加权平均, 从而插值出  $K$  点在各方向上相应的定位误差。

$$\begin{aligned} \Delta X &= \sum_{i=1}^8 \Delta X_i q_i \\ \Delta Y &= \sum_{i=1}^8 \Delta Y_i q_i \\ \Delta Z &= \sum_{i=1}^8 \Delta Z_i q_i \end{aligned} \quad (3)$$

**步骤 3** 用预测出的  $P$  点的定位误差对其理论坐标进行修正, 并用修正后的坐标值 ( $X^c, Y^c, Z^c$ ) 输入机器人控制器, 从而实现提高机器人绝对定位精度的目的。

$$\begin{cases} X^c = X_i + \Delta X \\ Y^c = Y_i + \Delta Y \\ Z^c = Z_i + \Delta Z \end{cases} \quad (4)$$

在机器人工作空间中选取任一位姿的测量点, 然后以它为中心, 分别以不同的网格步长确定相应的立方体网格顶点, 接着用上述步骤计算出立方体网格的各个顶点的定位误差, 采用基于工作空间权重度的机器人精度补偿方法预测出选定测量点处的误差, 最后再将预测出的误差和用定位误差模型计算出的该点的误差作比较得到残差, 通过残差的大小来判断精度补偿方法的有效性。

采用 KUKA KR150-2 型机器人为实验对象, 使用 FARO SI 型激光跟踪仪(测量精度为  $10 \mu\text{m} \pm 0.8 \mu\text{m}/\text{m}$ , 测量范围可达到 35 m)作为测量工具, 实验表明: 当步长为 340 mm 时, 机器人精度补偿的平均定位精度为 0.124 mm, 为所有参与统计的步长下平均定位精度最高值, 此时该步长下的所有

数据样本定位误差的最大值为 0.238 mm; 其次是步长为 260 mm 时, 机器人精度补偿的平均定位精度为 0.131 mm, 此时该步长下的所有数据样本定位误差的最大值为 0.301 mm; 当步长位于 260 ~ 340 mm 之间时, 机器人补偿后的绝对定位误差大于 0.4 mm 出现的概率最小; 综合考虑以上因素以及考虑对机器人工作空间划分的便利性, 选取 300 mm 步长作为最优网格步长, 这时, 机器人补偿后的绝对定位误差可以控制在  $\pm 0.4$  mm 以内。

### 3 末端执行器设计及法线检测技术

#### 3.1 末端执行器设计技术

末端执行器是安装在标准机器人法兰盘上的功能执行部件, 多功能末端执行器主要完成制孔、涂胶、铆接等任务。根据其实现的任务不同, 将末端执行器设计成模块化形式, 以适应不同装配要求, 多功能末端执行器主要包括的功能模块有: (1) 基准扫描模块; (2) 法线检测及找正模块; (3) 压力脚压紧模块; (4) 检测模块; (5) 工位转换模块; (6) 制孔模块; (7) 送钉模块; (8) 注胶模块; (9) 电磁铆接模块。

图 5, 6 分别为末端执行器及其工作流程示意图。实现制孔、注胶、送钉、铆接等功能模块安装在末端执行器基础框架上的直线横向滑板上; 在钻孔和铆接循环期间, 产品通过压力脚压紧模块实现工件的压紧; 用于检测法线及找正目的的激光位移传感器安装在压力脚旁边, 末端执行器装备有先进的各种电驱动或气动驱动的装置, 另外末端执行器上具有检测模块实现诸如镗孔深度、刀具破损等功能。

为保证制孔质量, 末端执行器上的在线检测模块起到了重要功能。在线检测模块根据各项检测项目的要求, 配置以光学传感器为主, 高精度接触传感器为辅助元件的检测系统硬件设备。系统进行如下检测:

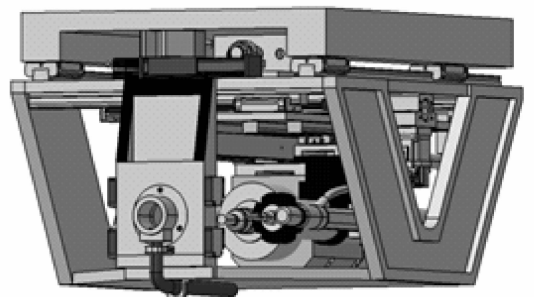


图 5 末端执行器示意图

Fig. 5 Schematic diagram of end effector

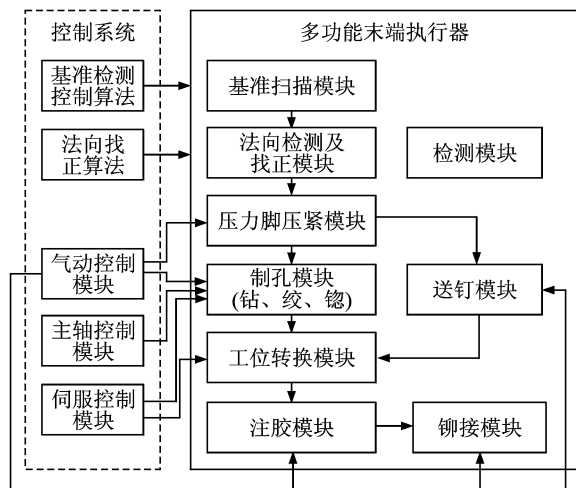


图 6 末端执行器工作流程

Fig. 6 Workflow of end effector

(1)加工基准检测:通过 2-D 激光位移传感器获得基准孔所在平面内的二维坐标( $X, Z$ ),以接触式距离传感器为辅助,测量 2-D 激光位移传感器沿  $Y$  向的平移量,从而将 2-D 传感器的测量值从二维扩展到三维,然后经过边缘特征提取、边缘投影、基准孔特征识别等数学方法,测量出基准孔的位置;

(2)刀具零点检测:采用 3 个接触式距离传感器来实现,3 个传感器安装在同一平面内,测头均伸入一个刚性圆筒内,分布在以圆筒轴线位置为中心的同一段圆弧上。当圆筒轴线、刀具轴线和主轴回转轴线重合时,系统记录下 3 个传感器测量的距离值,设定为理论值。末端执行器的刀具对准零点检测装置的圆筒,系统记下 3 个传感器的测量值,通过数学处理,计算刀具的实际位置,并与理论进行对比找出偏差,以此修正刀具中心点(Tool center point, TCP)的位置。

(3)各层材料厚度和镗窝深度的检测:通过在主轴上安装与主轴同时进给的接触式距离传感器来实现。

(4)孔厚自动检测:采用一个微小的激光光纤传感器,伸进孔内部。光纤传感器从侧面发出光线照在孔内壁,传感器以一定速度从孔内移动,通过光栅尺记录传感器信号变化过程中传感器的移动量,即为孔厚度。

(5)刀具破损检测:采用激光光电传感器实时监测刀具的状态,刀具突然断裂时,传感器接收到的电信号会发生变化,以此来判断刀具是否破损。

项目组设计的末端执行器的性能为:外形尺寸长 $\times$ 宽 $\times$ 高约为 750 mm $\times$ 290 mm $\times$ 350 mm,质

量约为 150 kg;可制孔的直径范围为  $\phi 3 \sim 8$  mm,制孔材料为铝合金;采用气动压紧,压紧力范围为 100~300 kg,压紧行程为 0~60 mm;主轴的最高转速为 24 000 r/min,额定转速为 6 000 r/min,连续扭矩 1.5 N $\cdot$ m;附加外冷却设备和真空吸屑装置等。

### 3.2 法线检测及找正技术

制孔过程中,制孔质量和铆接质量取决于刀具主轴是否与被加工表面垂直,因此被加工工件表面的法线检测及末端执行器主轴找正技术是实现这一任务的关键。

法线检测单元采用数个涡流传感器或小型激光测距仪进行多点测量以确定工件加工点的法线,反馈至机器人控制系统进行调整以保证制孔的垂直度要求。

法线检测由 4 个非接触式激光位移传感器和相关模拟量输入模块组成,4 个位移传感器等布局在以刀具轴线为中心轴的圆柱面上,且均与刀具轴线成约  $45^\circ$  的夹角安装,以使得发出到蒙皮表面的 4 个激光束在不交叉的前提下又能够足够靠近,即四束激光在蒙皮表面形成的区域尽可能小,如图 7 所示。

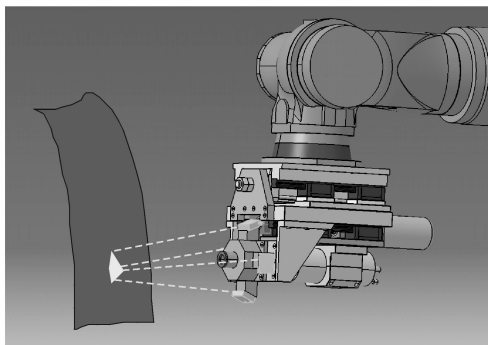


图 7 法线检测单元

Fig. 7 Normal measurement unit of workpiece surface

当机器人准备加工蒙皮某特定位置上的孔时,根据离线编程系统已编制的数控程序控制机器人定位到合适的姿态和位置上,使末端执行器上的刀具接近蒙皮且刀具轴线近似垂直于蒙皮表面待加工点附近的微小区域,4 个位移传感器检测到蒙皮表面之间的距离,根据这 4 个距离,通过相关算法计算蒙皮的实际法线位置及机器人需要调整到的姿态,最后输出调姿信息并通过控制系统姿态调整,使末端执行器主轴与蒙皮的法线一致,实现法向找正以达到法向定位的精度要求,如图 8 所示。

通过这种方法,找正后的刀具轴向与工件实际法向的偏差均小于 $0.5^\circ$ ,平均法向找正误差为 $0.317^\circ$ 。

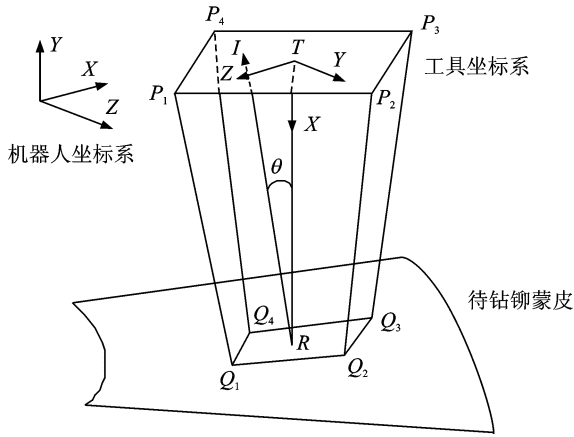


图8 法线检测装置几何模型

Fig. 8 Geometry model of normal measurement unit

## 4 飞机柔性装配系统实现技术

### 4.1 系统控制技术

柔性装配自动化制孔系统过程为:首先初始化系统,进行相关设备的初始化与预热,在自检成功后进行相应试钻、测试等流程。测试成功后导入加工NC代码(由离线编程系统生成),进行程序处理与执行。执行后按照每个分站点制孔循环过程进行加工,一个站点完成所有加工后进入下一个站点进行相应加工任务。制孔加工循环为:(1)系统初始化及自检;(2)基准扫描及基准误差补偿;(3)法向找正;(4)自动制孔循环;(5)本站加工循环;(6)换站点加工直至系统加工任务结束。飞机柔性装配自动化制孔控制系统加工流程及控制系统硬件组态,如图9,10所示。

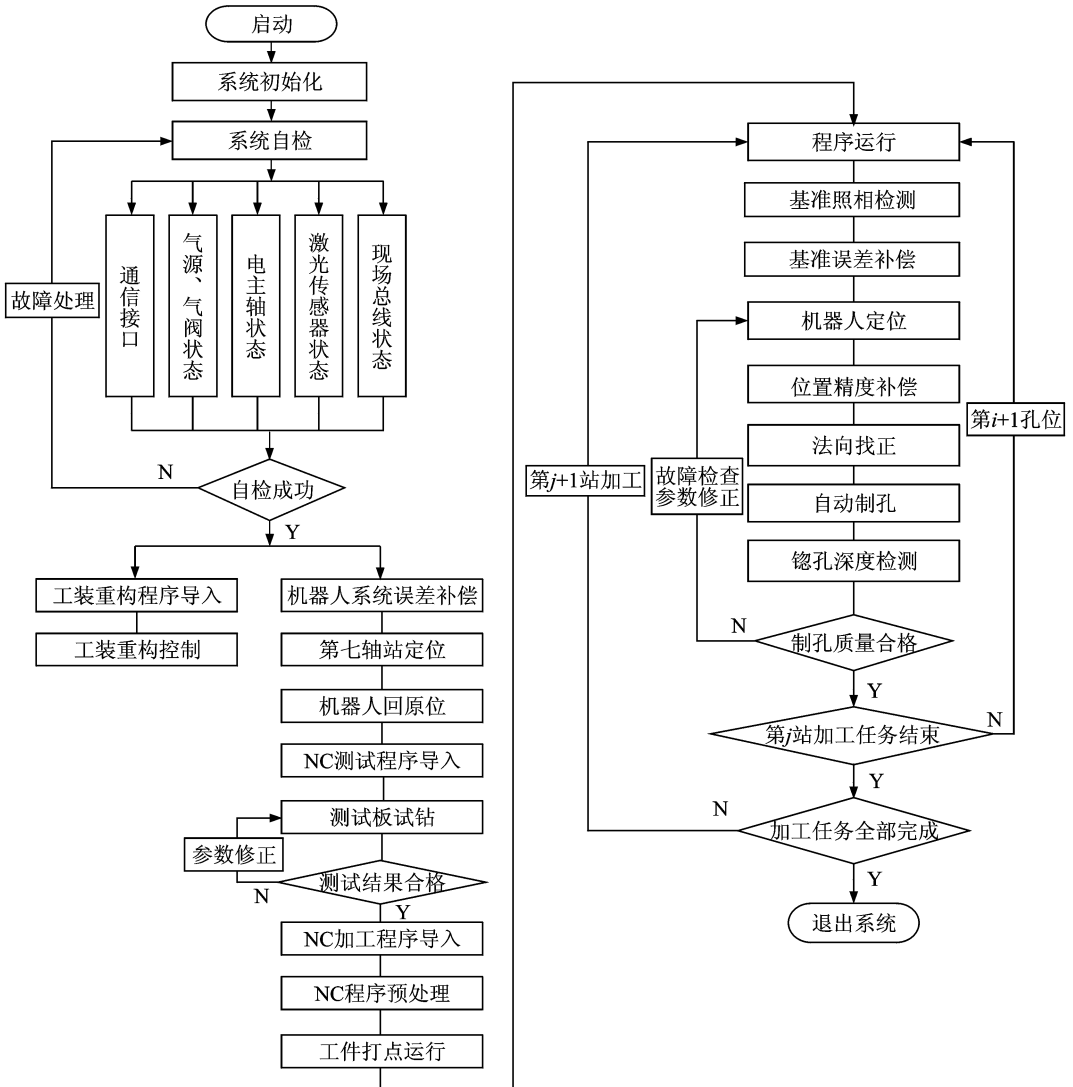


图9 控制系统总体工作流程图

Fig. 9 Workflow of control system

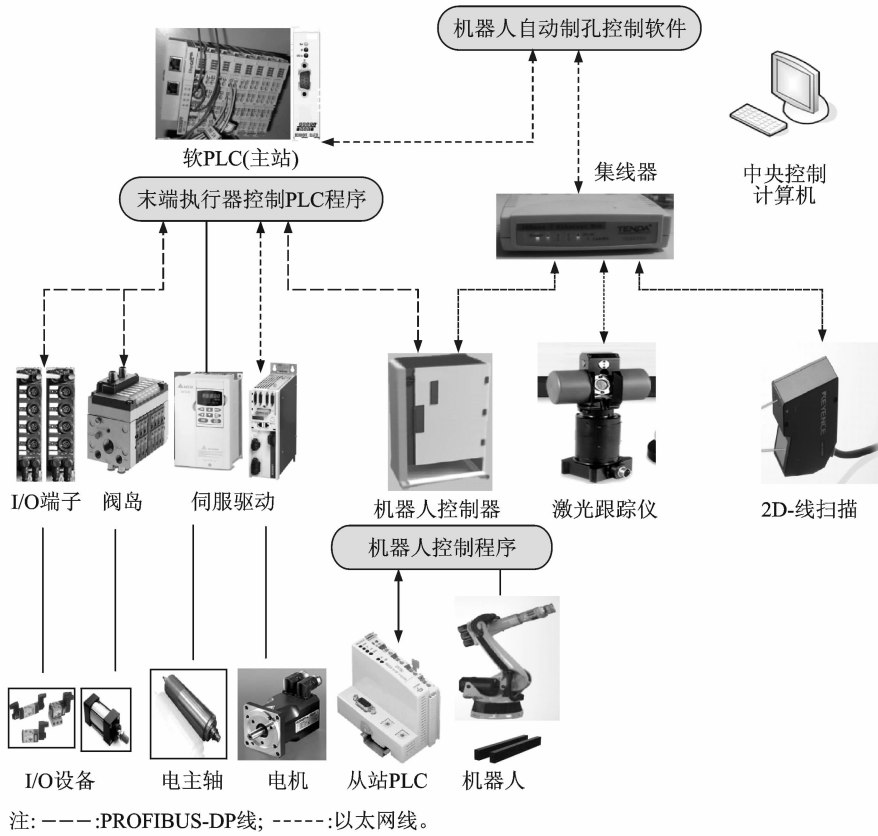


图 10 控制系统硬件组态

Fig. 10 Hardware configuration of control system

4.2 离线编程技术

在机器人应用系统中,机器人编程是一个关键环节,对于飞机装配而言,所需要加工孔数量众多,采用机器人示教编程方式,不太现实。并且随着制造企业柔性要求的进一步提高,便需要更高效和更简单的编程方法,机器人离线编程系统是机器人编程语言的拓广,利用产品模型,建立起机器人及工作环境的模型,再利用路径规划算法,在离线情况下进行机器人路径规划。

一般地,离线编程系统所具有的功能有:(1)产品加工信息提取和管理;(2)坐标系及 TCP 管理;(3)用户信息数据库、刀具参数库、工艺参数优选库以及系统坐标系库等数据库管理;(4)机器人加工任务规划,实现机器人的站位、路径、姿态、状态等的规划;(5)机器人调型任务规划,柔性工装的调整;(6)末端执行器任务规划,对末端执行器制孔、检测等任务的规划;(7)事件生成与管理,对法线检测模式、等待、信息提示、孔位跳过、材料加工信息设置等事件的生成与管理;(8)运动仿真与碰撞检测,对自动生成的 NC 程序运动仿真和碰撞检测,进行干涉检查。

采用从产品数模中提取出所有孔位的完整设计信息,生成产品设计信息数据文件;采用 Visual C++ 和 OpenGL 混合编程开发可视化交互的离线编程系统,系统读取产品设计信息数据文件,对机器人任务、末端执行器任务以及系统特殊工艺事件进行离线规划,通过后置处理模块生成符合预定编码格式的 NC 程序;最后建立 NC 程序的仿真任务并进行碰撞干涉检查,以确保离线程序的准确性与可靠性。图 11 为离线编程系统的各个组成部分

CATIA 通用三维设计平台	离线编程任务	DELMIA 三维仿真与后处理
<ul style="list-style-type: none"> <li>利用用户定义特征(User defined feature,UDF)设计工件待加工孔的几何信息</li> <li>利用UDF设计工件待加工孔的工艺信息</li> <li>设计孔类型标识</li> <li>⋮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>工件基准信息识别与管理</li> <li>坐标管理、转化</li> <li>机器人加工姿态与状态规划</li> <li>机器人运动轨迹规划</li> <li>末端执行器动作规划</li> <li>加工工艺参数规划</li> <li>生成可执行离线NC程序</li> <li>⋮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>整体系统建模、布局与标定</li> <li>导入离线编程软件生成的代码,检查是否会发生干涉</li> <li>若发生干涉,提供修正策略</li> <li>⋮</li> </ul>

图 11 离线编程体系结构

Fig. 11 Off-line programming system structure

及体系结构,图12为离线编程生成的NC程序示例。

```
//当前程序为:产品制孔程序
//产品信息路径为:D:\NC数据\处理.txt
//操作者及其权限为:管理员
//程序编制时间为:2013年12月29日13:40:52
//产品偏置距离为:0.00
//系统安全距离为:200.00
//进退刀距离为:500.00
N0000 M70 T=1;设置系统工装坐标系
N0010 M80 T=1;检查系统工装是否准备就绪
N0020 M72 T=3;设置系统工具坐标系
.....
//(------新建序列3 工艺设置-----)
N00300 G60 P=65;将机器人由任意位置移动到HOME点
N00310 M110 T=TL01;设置刀具编号
N00320 M120 T=121.00;设置压紧力大小(N)
.....
N00390 M177;打开断刀检测
N00400 M87;打开法向位移传感器
//(------新建序列3 机器人走位-----)
N00410 G07 X=-40.08 Y=1851.60 Z=918.09 A=90 B=0.0000
C=180;避让点
N00420 G00 X=-40.08 Y=2351.57 Z=923.54 A=89.3754
B=0.0000C=180.0000;5 p09p09p00
(3 4.160 7.9 0.94 130 A079)
N00430 M100 NAME=p09p09p00;开始一个制孔循环
.....
N00810 G60 P=95;将机器人移动到HOME点位置N
00820 M30;程序结束
```

图12 NC程序示例

Fig. 12 Example of NC program

## 5 结束语

本文开发了基于机器人的飞机柔性装配系统,在某主机厂小翼部件上进行应用,达到制孔精度H8、孔位精度 $< \pm 0.5$  mm、法向精度 $< \pm 0.5^\circ$ 、镗窝精度0.01 mm、制孔效率3~4个/min等技术指标,制孔效率提高了大约6倍,制孔质量和一致性大大提高,达到了设计和应用指标。因此,上述研究表明,将标准的关节手臂机器人系统用于航空工业生产中,能够满足特定的航空工业生产的要求。

## 参考文献:

- [1] 许国康. 大型飞机自动化装配技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 734-740.  
Xu Guokang. Automatic assembly technology for large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 734-740.
- [2] Li Shiqi, Peng Tao, Wang Junfeng, et al. Mixed reality-based interactive technology for aircraft cabin assembly[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2009, 22(3): 403-409.
- [3] 王亮, 李东升. 飞机数字化装配柔性工装的低成本化[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(Z1): 27-31.  
Wang Liang, Li Dongsheng. Low cost of flexible

tooling technology for aircraft digital assembly[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(Z1): 27-31.

- [4] Stolt A, Linderoth M, Robertsson A, et al. Force controlled assembly of flexible aircraft structure [C]//Proceeding of Robotics and Automation (ICRA). Shanghai, China: IEEE, 2011: 6027-6032.
- [5] DeVlieg R, Sitton K, Feikert E, et al. ONCE (One-sided cell end effector) robotic drilling system [C]//SAE 2002 Automated Fastening Conference & Exposition. Chester: SAE, 2002: 01-2626.
- [6] Atkinson J, Hartmann J, Jones S, et al. Robotic drilling system for 737 aileron [C]//SAE 2007 Aero-Tech Congress & Exhibition. Los Angeles, CA, USA: SAE, 2007: 01-3821.
- [7] DeVlieg R, Feikert E. One-up assembly with robots [R]. SAE Technical Paper, 2008-01-2297, 2008.
- [8] 邓锋. 采用标准关节机器人系统对飞机货舱门结构的自动钻铆[J]. 航空制造技术, 2010(19): 32-35.  
Deng Feng. Automated fastening of aircraft cargo door structures with a standard articulating robot system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(19): 32-35.
- [9] Russell D. High-accuracy robotic drilling/milling of 737 inboard flaps[R]. SAE Technical Paper 2011-01-2733, 2011.
- [10] Scott R, Curtis R. High path accuracy, high process force articulated robot [R]. SAE Technical Paper, 2013-01-2291, 2013.
- [11] 高明辉, 张杨, 张少擎, 等. 工业机器人自动钻铆集成控制技术[J]. 航空制造技术, 2013(20): 74-76.  
Gao Minghui, Zhang Yang, Zhang Shaoqing, et al. Integrated control technology of automated fastening with industry robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(20): 74-76.
- [12] 姚艳彬, 毕树生, 员俊峰, 等. 飞机部件机器人自动制孔控制系统设计与分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(17): 2021-2024.  
Yao Yanbin, Bi Shusheng, Yuan Junfeng, et al. Design and analyses of robot automatic drilling control system of aircraft components[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(17): 2021-2024.
- [13] 杜宝瑞, 冯子明, 姚艳彬, 等. 用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统[J]. 航空制造技术, 2010(02): 47-50.  
Du Baorui, Feng Zhiming, Yan Yanbin, et al. Robot drilling system for automatic drilling of aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(02): 47-50.
- [14] 董辉跃, 曹国顺, 曲巍崑, 等. 工业机器人自动钻孔及



- 铤窝一体化加工[J]. 浙江大学学报:工学版,2013,47(2):201-208.
- Dong Huiyue, Cao Guoshun, Qu Weiwei, et al. Processing research of industry robots drilling and countersinking automatically[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013,47(2):201-208.
- [15] 李菡,余德忠. 一种基于双机器人的自动钻铆终端器设计[J]. 机械科学与技术,2010,29(10):1297-1301.
- Li Han, Yu Dezhong. Design of a drilling & riveting end-machine based on dual-robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010,29(10):1297-1301.
- [16] 龚星如,沈建新,田威,等. 工业机器人定位误差补偿方法与实验研究[J]. 机械与电子,2012(7):64-67.
- Gong Xingru, Shen Jianxin, Tian Wei, et al. Research on method and experiment of the industrial robot positioning error compensation[J]. Machinery & Electronics, 2012(7):64-67.
- [17] 戴家隆,沈建新,田威,等. 自动化钻孔系统柔性控制[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(S):56-59.
- Dai Jialong, Shen Jianxin, Tian wei, et al. Flexible control of automatic drilling system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012,44(S):56-59.