

# 飞机结构件生产线加工关键技术研究与应用

俞鸿均,汪裕杰,熊航,马南峰,何辉

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

**[摘要]** 随着飞机先进制造技术的快速发展,对飞机结构件设计与制造提出了更高的要求。国外先进航空制造企业为顺应飞机制造业结构件柔性化及自动化制造需求,已经开始了以自动化生产线为代表的飞机结构件生产模式。因此,通过对飞机中小结构件三坐标生产线加工模式的概述,研究飞机结构件生产线加工工艺方法、数控编程及测量等关键技术,并应用于典型结构件加工中,验证关键技术的可行性,提高航空制造企业的生产效率和产品质量,减少资源浪费和节约成本。最终实现飞机结构件生产线的制造模式,并对提高航空制造技术整体水平产生重要作用。

**关键词:** 飞机结构件;自动化生产线;加工工艺;测量;智能制造

## Research and Application of Key Technologies in Aircraft Structural Parts Production Line Processing

YU Hongjun, WANG Yujie, XIONG Hang, MA Nanfeng, HE Hui

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** With the rapid development of advanced aircraft manufacturing technology, higher requirements are put forward for the design and manufacturing of aircraft structural parts. In order to meet the needs of flexible and automated manufacturing of structural parts in aircraft manufacturing industry, foreign advanced aviation manufacturing enterprises have started the production mode of aircraft structural parts represented by automated production lines. Therefore, this paper summarizes the processing mode of the three-coordinate production line of small and medium-sized aircraft structural parts, and studies the key technologies of the production line for aircraft structural parts processing technology, numerical control programming and measurement etc, which will be applied in the processing of typical structural parts, aiming to verify the feasibility of the key technologies, improve the production efficiency and product quality of aviation manufacturing enterprises, reduce the waste of resources and save costs. Then finally realizing the manufacturing mode of aircraft structural parts production line and playing an important role in improving the overall level of aviation manufacturing technology.

**Keywords:** Aircraft structure; Automatic production line; Processing craft; Measurement; Intelligent manufacture

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.18.083

随着工业 4.0 的到来,数字化、自动化、柔性化及智能化的制造技术已经成为飞机制造业发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。为节约生产成本,减少人力,国外军、民用飞机制造公司将飞机数字化生产线制造关键技术作为重要的核心技术。在同类型产品数字量尺寸协调体系的基础上,飞机制造全过程大量采用数字化脉动式生产线制造的模式,通过零组件无人工干预加工,数字化装配等制造领域实现生产线加工模式。近年来我国航空制造技术得到飞速发展,以信息化方式驱动的航空产品、装备、工艺、管理、服务的数字化、自动化及智能化制造已经成为航空制造业的重要发展方向<sup>[2]</sup>。国外先进航空制造企业为顺应飞机制造行业结构件柔性化及自动化发展的需求,

已经开启以自动化生产线为代表的飞机结构件的生产模式<sup>[3]</sup>。为适应新一代飞机的技术要求,以及大幅度提高企业的生产效率和产品质量,国内航空主机制造企业已经大力发展飞机结构件生产线制造模式,实施以数字化、自动化及信息化为基础的生产线建设,提高飞机结构件加工数字化与自动化制造水平,推动飞机制造业的转型升级。

因此,通过对飞机中小结构件三坐标生产线加工模式的概述,研究飞机结构件生产线加工工艺方法、数控编程及测量等关键技术,通过自主化研发设计,可以摆脱国外在某些技术领域的限制,节约成本,最终实现飞机结构件生产线制造模式,对提高航空制造业整体技术

水平具有重要应用意义。

### 1 典型飞机结构件加工生产线概述

国外知名制造企业如美国通用电气公司为 JSF35 制造配备的座舱生产线,已经实现飞机结构件的部件集成自动化生产线模式;德国 AEROTECH 公司以生产线的模式实现了多品种、大批量民机结构件的柔性生产,平均设备利用率达到 90% 以上<sup>[4]</sup>。而国内航空制造企业为适应飞机结构件加工的发展趋势,大量引进与研发先进机床,同时自主发展生产线和柔性制造单元,初步实现了生产线加工,以及多台机床无人工干预数字化、自动化加工。

飞机结构件加工生产线以产品类型、生产批次纲领、加工工艺路线等为主要的因素,选择合理的人机交互工作平台、柔性定位托盘或工装、测量与检测设备、存储与停放设备、输送设备、物流管理等结合的自动化加工单元<sup>[5]</sup>。典型的飞机结构件加工生产线布局如图 1 所示。

该生产线主要有 4 台三坐标加工机床、搬运及多自由度机械臂、自动感应门、机械臂运输导轨、毛坯安装工作台、人机交互控制版、生产线控制柜及毛坯安装与准备物流库组成。飞机结构件生产线加工主要通过开展零件自动上下料、刀具快速更换、零件加工原点自动找正及加工状态在线测量等技术研究,实现结构件生产线中的自动化加工,提高加工效率,节约成本<sup>[6]</sup>。

为保证生产线无人工干预加工,采用零点快速定位托盘系统实现零件在机床上的自动装夹。将零件毛坯与定位托盘进行连接,多自由度机械臂抓手与定位托盘进行相连,与机床零点定位系统进行配合,实现自动定位。定位托盘上具有 6 个定位接头与工作台上零点定

位器的配合精度在 0.005mm 以下。连接有定位托盘上的定位接头与机床零点定位器配合,通过零点定位器自锁功能实现零件的装夹,单个零点定位器的夹持力可达 2t。具体连接方式与技术要求如图 2 所示。

对典型飞机结构件生产线加工毛坯尺寸及规格进行约束,保证加工工艺性并进行安全加工;对定位托盘间距、工艺定位孔及压紧孔等实现标准化,形成刀具与刀具参数库,并对零件的结构特征及类型进行分类,实现生产线上零件的高质高效的加工;通过多自由度机械臂抓取托盘与机床实现自动装配,利用机床探头对工装状态及零件毛坯位置进行自动原点找正,并依据测量结果实现工件原点坐标系及工装平面度误差的自动补偿。在加工过程中,为保证工装状态自动检测结果的准确度,利用机床自清洁功能或添加相应的清洁工具,对加工过程中工装表面的自动清洁,减少加工中基准误差。

### 2 典型飞机结构件加工生产线关键技术

通过对典型飞机中小结构件三坐标生产线加工模式的概述,研究飞机结构件生产线数控加工工艺方法、数控编程及测量等关键技术,从而实现飞机结构件生产线无人工干预自动化加工。

#### 2.1 生产线数控加工工艺分析

通过明确生产线技术要求,针对生产线加工需求对零件进行分类,制定上线零件的加工工艺,明确上线零件的工艺准备要求,分析上线零件的误差产生的各方面原因及需要注意的问题,并以此为基础,对上线零件加工工艺进行合理计划与制定,设计与制作加工工艺流程如图 3 所示。

通过对典型上线零件的 EBOM 与 PBOM 工艺数模信息读取,确定零件的加工工艺路线,从而确定零件的

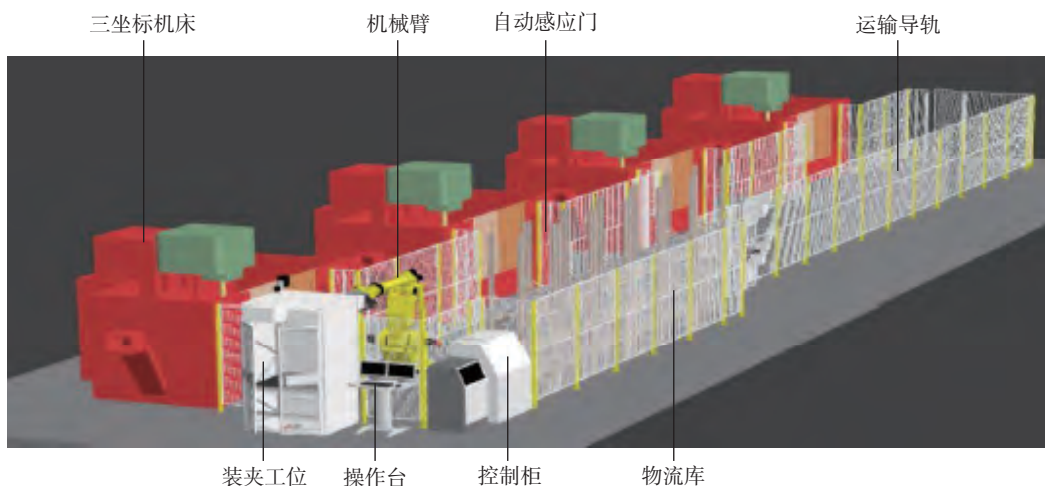


图1 典型的飞机结构件加工生产线布局

Fig.1 Typical layout of production line for aircraft structural parts processing

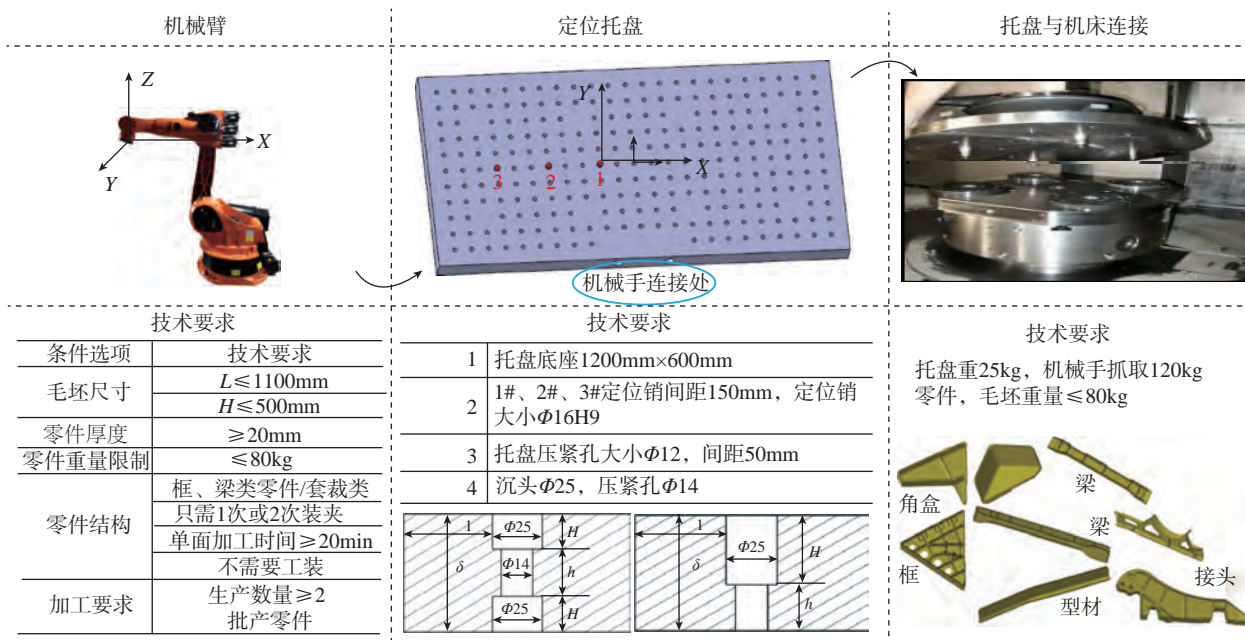


图2 生产线装夹方式与技术要求  
Fig.2 Clamping mode and technical requirements of production line

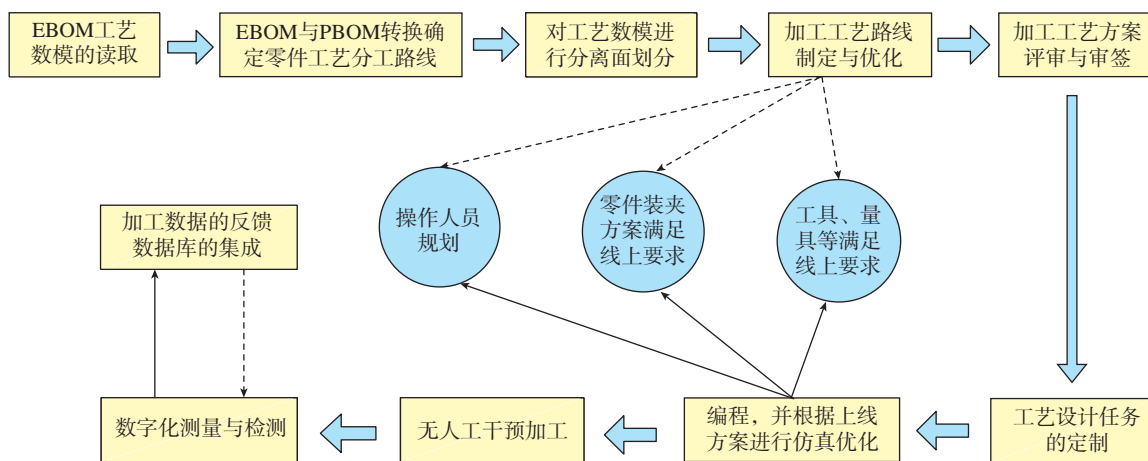


图3 设计加工工艺流程  
Fig.3 Design and processing process flow

定位基准。明确上线零件加工方案总体布局并制定加工工艺路线,全面考虑零件的定位与夹紧方案,实现零件加工方案的系列化、标准化,同时将零件编程规范化,达到无人工干预加工的目的;也可以将典型结构件加工的工艺参数进行标准化管理,从而为同类型的零件提供加工参考,提高零件加工效率。根据上线零件加工工艺技术要求,制定加工工艺步骤如图4所示。

熟悉零件的工艺方案制定流程,设计并制定零件的加工工艺步骤为:

(1)线外主要根据制造大纲进行零件的吊装孔、特种检验、铣基准面、钻工艺孔及压紧孔等工艺准备工作,

方便上线零件的定位与装夹。

(2)线内主要进行零件的粗精铣、翻面粗精铣、制零件孔等工序加工。简化工艺规程,前期主要包含装夹、更换刀具、更换工装及调整压紧位置等工步。而线内零件加工只包含零件的装夹与拆卸工步,节约工艺准备时间。

(3)完成零件的加工,进行数字化测量后,线外去除工艺凸台,局部进行钳工锐边倒圆,表面处理完成终检及保护交付。

典型飞机结构件主要由腹板与缘条等特征组成框、梁、接头等,容易实现无人工干预生产线加工,针对典型

的飞机结构件生产线加工工艺流程及方案的制定,实现飞机结构件生产线数控无人工干预加工,提高零件加工效率,节约成本<sup>[7]</sup>。

## 2.2 生产线数控加工编程技术

### 2.2.1 生产线零件加工坐标系2种设置方法

将零件坐标系统一设置在零点定位托盘与零件接触面,  $Z_0$  设置在制定 1#、2#、3# 定位原点,在零件加工之前对零件毛坯进行修面,保证零件的对刀精度。

将零件的第一面加工坐标系设计在毛坯上表面,第二面零件加工坐标系设置在毛坯底面,只需在仿真加工时设置子程序参数。

### 2.2.2 零件编程进退刀设置方法

生产线安全平面距离设置 100mm,所有抬刀安全距离须高出零件筋条或缘条上表面 20mm,在零件即将切削零件表面时,不能以 G00 的速度进刀,从安全表面以 G00 的速度下刀距离 5mm 至零件切削位置,再以直线或圆弧方式以 G01 的速度进刀,示意图如图 5 左上所示。

在生产线上,零件为无人工干预加工程序,零件粗加工外形与内形时,尽量采用螺旋或斜线进刀,不过中心刀具的下刀角度必须  $\leq 3^\circ$ ,过中心刀具  $\leq 8^\circ$ ,如图

5 左下所示。

大多数结构件包含减轻孔。在生产线上,对零件的减轻孔、异型孔编程时,一般在毛坯的第一面进行加工。当减轻孔或者异形孔最小直径  $>50\text{mm}$ ,在粗加工时,可以直接铣开,周边留 1mm 余量以便后续精加工;当最小直径  $\leq 50\text{mm}$  时,在粗加工时不对其进行开粗加工,待后续腹板加工完成后再进行单独加工。以轴向优先,径向分层方式加工,每层轨迹最大距离为  $D$  (刀具直径)  $-2R$  (刀具底角)  $-1$ ;层数为减轻孔半径  $\div (D-2R-1)$  (不足整数的,取整数加 1,如 2.1 则取 3);减轻孔深度加工到距底部  $(R+1)$  距离,  $R$  为刀具底角采用螺旋下刀的方式,如图 5 右上所示。

生产线上零件加工时,为避免最后铣开零件凸台转角处余量过大从而导致刀具受力不均衡发生零件切削断刀、弹刀现象,刀具在距离外形 10mm 的位置设置进退刀,添加转角减速功能,在两处凸台侧面留 5mm 余量,避开凸台与零件转角处余量的突然增大,如图 5 右下所示。

## 2.3 结构件批量加工组合式快速测量技术

面向生产线批量零件的检测方式,传统的测量方法

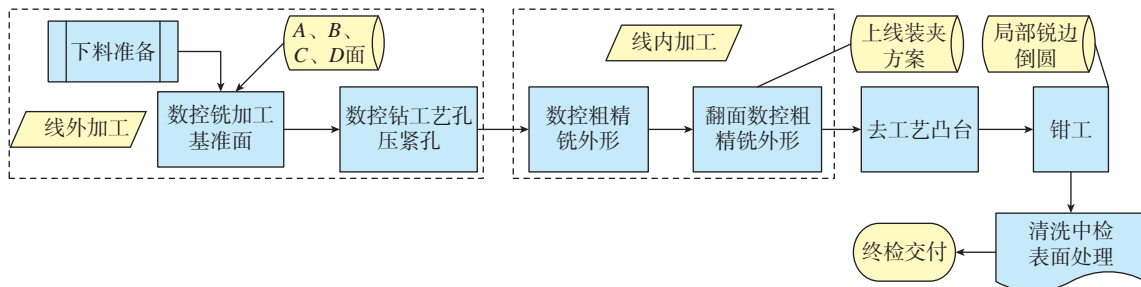


图4 制定加工工艺步骤  
Fig.4 Formulating processing

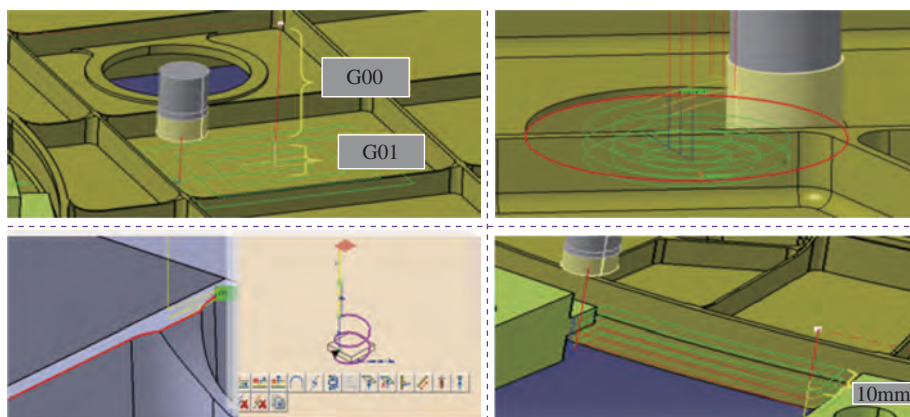


图5 进退刀设置示意图  
Fig.5 Schematic diagram of tool settings for advance and retreat

已无法满足批量零件的测量,而对飞机结构件组合式快速测量技术研究相对较少<sup>[8]</sup>。为解决实现生产线上完成加工零件的快速测量,或者去除工艺凸台零件无法检测的各类矛盾和问题,将采用多种组合式测量工装与三坐标测量机结合的方式,解决批量零件的快速测量。生产线上批量零件的测量,建立坐标系的正确与否,直接影响测量精度,通常有3-2-1法、最佳拟合法以及迭代法等。

(1) 3-2-1法通常用于有规则形状的外形,可以直接利用结构类模型特征在零件关键特征基础上确定模型空间坐标系。

(2) 最佳拟合法利用分布在同一平面上的相同规格的3个及以上的圆,或者在零件上找3个及以上相同直径大小的圆(可以在零件上粘贴TB点),通过测量3个及以上圆拟合出零件空间坐标系,若已知这3个圆的坐标,可以通过3个圆的坐标值,直接拟合建立坐标系。

(3) 迭代法在三坐标中可以用几个几何精度不同的特征元素来建立坐标系,通过特征元素的约束方向不同,最终确立坐标系。迭代法与最佳拟合法原理相似,最佳拟合法将坐标系误差均分在3个坐标轴上,迭代法按照约束零件特征关系的多少来分配各轴的误差,在某一轴上可能存在误差为零的现状,迭代法常应用在结构形状较复杂的情况下。

三坐标测量机中坐标系主要由三坐标机床本身与测头坐标系转换组成。在测量飞机结构件时,通常在相对坐标系下评价零件的理论数据与实测数据。主要以测头和零件的相对坐标系当作刚体分析,零件的相对空间位置和姿态的确定是通过测头上在空间的移动位置建立一个表达其状态的坐标系。以 $\{o_0x_0y_0z_0\}$ 作为中小结构件基准坐标系,用 $\{o_ix_iz_i\}$ 表示三坐标测头*i*的位姿,如图6所示。用 $\mathbf{n}$ 、 $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{o}$ 3个相互垂直的方向矢量、另一个位置矢量 $\mathbf{p}$ 组成三坐标测头*i*的位姿矢量 $o_0o_i$ 。矢量 $\mathbf{n}=[n_x, n_y, n_z]^T$ 、 $\mathbf{a}=[a_x, a_y, a_z]^T$ 、 $\mathbf{o}=[o_x, o_y, o_z]^T$ 分别为坐标系

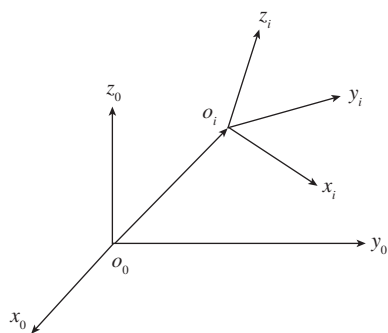


图6 三坐标与零件测量空间位姿图

Fig.6 Spatial posture map of parts measurement and three-coordinate

$\{o_ix_iz_i\}$ 的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴相对于基准坐标系 $\{o_0x_0y_0z_0\}$ 的3个方向矢量, $\mathbf{n}$ 、 $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{o}$ 符合右手法则,矢量 $\mathbf{p}=[p_x, p_y, p_z]^T$ 为坐标系 $\{o_ix_iz_i\}$ 的原点在基准坐标系 $\{o_0x_0y_0z_0\}$ 中的位置矢量,写成齐次矩阵形式为:

$$\mathbf{T}_{A,B} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

齐次矩阵中的 $\mathbf{A}_{11}$ 是方向余弦矩阵, $\mathbf{A}_{12}=\mathbf{p}$ 是坐标变换的平移量。绕 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴旋转任意角度 $\theta$ 的变换矩阵方程式分别如下:

$$R_{o_i t}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{o_i t}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_{o_i t}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

坐标系之间的平移变换矩阵为:

$$\text{Trans}(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过以上坐标转换关系,实现三坐标测量机与零件之间检测的测量坐标系,在飞机结构件测量过程中,通常在有工艺凸台情况下测量零件特征,针对现有零件大批量的情况,多台三坐标测量机无法满足快速测量需求。因此,设计组合式柔性工装,可以针对不同的工艺凸台,调整定位孔间距,通过采用3-2-1法或最佳拟合法快速建立坐标系。在大批量零件或者不同的零件只需定位孔的间距一致,只可建立一次坐标系完成大批量零件的测量。组合式通用工装与坐标系转换关系如图7所示。

通过使用如图所示组合式通用工装,针对不同类型的工艺凸台及定位孔进行定位,通常情况定位孔间距已经实现标准化,形成一定的等比例设置,当遇到不同结构件形状复杂的工艺凸台时,可以设计组合式工

装与三坐标测量机平台连接实现快速测量。不同结构件测量建立坐标系时,可通过TB点一次性建立坐标系,后期通过坐标系的转换关系,将结构类零件的飞机坐标系转换至相对基准孔的坐标系下进行测量,再通过基准孔与TB孔的坐标系移动与旋转组合实现快速测量。当建立坐标系时,坐标轴原点沿某一轴平移指定距离情况下建立坐标系,一般情况是先旋转角度后再偏置原点。通过使用组合式工装与坐标系转换关系,基于桥式三坐标测量仪可以建立快速测量系统,实现结构件加工完成后快速测量,从而提高零件检测速度与周转周期。

### 3 典型飞机结构件生产线加工关键技术的应用

以某型飞机中小结构件批量加工方法为例,检验生产线关键技术的应用,某典型零件为主要由缘条、筋位及腹板组成的接头类零件。

(1)该零件为典型双面加工三坐标零件,长度为390mm,宽度为275mm,厚度为122mm,满足生产线加工需求,节约成本,将零件左右件套裁加工。毛坯尺寸为

为640mm×320mm,为满足生产线加工需求,采用6-M12压紧螺栓压紧,凸台采用搭接与连接相互结合的工艺方案。

(2)选用 $\Phi 20R3$ 、 $\Phi 20R0$ 、 $\Phi 16R3$ 、 $\Phi 16R3$ (倒锥刀)、 $\Phi 12R3$ 这5种规格刀具,工装采用零点定位托盘。

(3)根据零件的在定位托盘布局将零件定位原点设置在托盘的点2位置,进行数控编程。后期提取后置程序文件,将程序文件通过宏程序代码完成串联,在串联后的仿真程序中添加工艺孔间距、毛坯厚度、零件定位原点以及坐标系位置。完成串联程序设置,进行程序加工仿真。仿真流程设计如图8所示。

(4)在生产线上,提前对加工的布局可以使用DELMIA进行生产线布局仿真,再使用CATIA进行加工路径准备。本实例中零件每批次16件,根据毛坯大小,考虑机械臂抓取位置及受力分布,将工艺定位孔设置在2#位置。编程时将程序进退刀以及参数进行标准化并固化,完成该零件的程序编制并进行仿真设置,实现生产线批量加工,最终实现数字化测量。零件工艺准备到加工完成的过程图如图9所示。

根据生产线加工的特性,对零件的加工装夹方式、

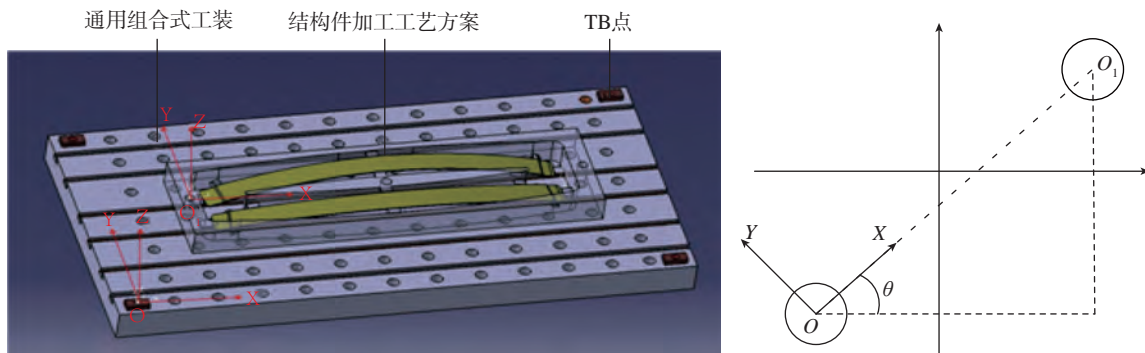


图7 组合式通用工装与坐标系转换关系

Fig.7 Conversion relation between composite universal tools and coordinate system

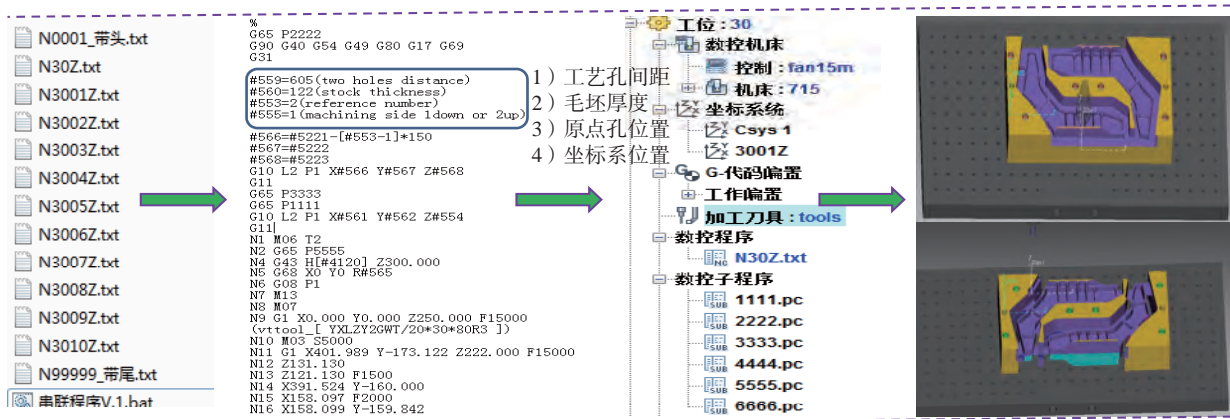


图8 程序仿真流程设计

Fig.8 Program simulation process design

表1 原有方案与生产线加工对比

Table 1 Comparison between the original and the optimized scheme

高效方案试切	生产线优化方案		原有加工方案	
	线外连续装夹,减少搬运		单件加工装夹,多次搬运	
	工序说明书包含装夹与拆卸工步		工序说明书包含多个工步	
	规范刀具库,加快编程效率		需要建立刀具库	
	刀具及参数	时间/h	刀具及参数	时间/h
粗加工	$\Phi 20R3$ S6500 F2500 Ap3 Ae50%	2.2	$\Phi 20R3$ S5000 F1500 Ap2 Ae50%	3.8
筋顶轮廓	$\Phi 16R3$ S6500 F2500 Ap3 Ae1	1	$\Phi 12R3$ S5000 F1000 Ap3 Ae1	1.3
粗精转角	$\Phi 12R3$ S6500 F2000 Ap3 Ae1	1.2	$\Phi 12R3$ S4500 F1000 Ap2 Ae1	1.5
精内形	$\Phi 16R3$ S6500 F2500 Ap3 Ae1	2.8	$\Phi 16R3$ S6500 F2500 Ap3 Ae1	3.2
插转角	$\Phi 16R3$ (倒锥刀) S5000 F1500 桁距 0.3	1.5	$\Phi 16R3$ (倒锥刀) S5000 F1500 桁距 0.3	1.2
清底角	$\Phi 20R0$ S6500 F2000 Ap3 Ae50%	0.5	$\Phi 12R0$ S5000 F1000 Ap3 Ae50%	0.8

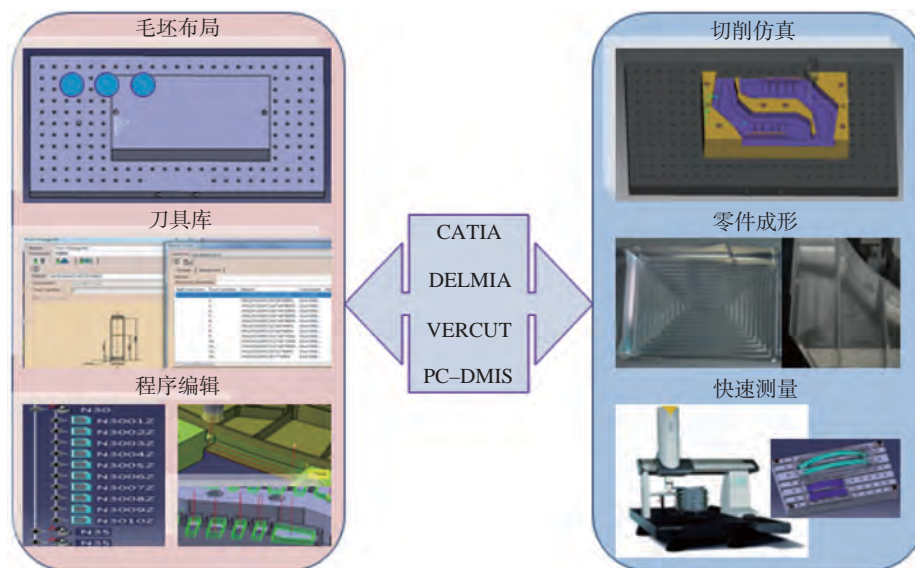


图9 零件加工完成的过程图

Fig.9 Process diagram of parts processing completion

刀具的规范、切削参数的选择等各方面进行优化与加工路线的调整。零件单件加工之前与生产线加工之后的数据对比结果如表1所示。

(5) 完成零件批量加工,采用桥式三坐标测量机与定位工装进行对特征的组合式快速测量。将带有凸台的零件按定位孔的间距放置,通过坐标系的旋转偏移命令将坐标系偏移至有组合式工装TB点的坐标系上,验证坐标系重合精度保持0.05mm以内,保存重合后的初始坐标系,将零件的测量数据程序调入零件坐标系下,测量机的绝对坐标系与飞机结构件坐标系通过齐次变换,转换成为相对坐标系即建立的初始坐标系,再进行测量。当第2件零件测量时,无需重新建立坐标系,直接可以根据TB点的坐标系对零件进行测量,从而提高零件的测

量效率,对减少零件的周转交付周期具有重要作用。

#### 4 结论

为适应飞机结构件加工先进制造技术快速发展,改变现有飞机结构件生产制造模式,实施以数字化、信息化为基础的生产线加工模式。通过介绍飞机结构件生产线的概述,研究生产线数控加工的工艺分析、编程技术、组合式快速测量等关键技术,并在某型飞机中小结构件生产线加工上应用,不仅提高了现有结构件加工效率,也为后期发展五坐标数控加工生产线及智能制造模式做研究基础和应用参考。

(下转第101页)

[2] 徐家文, 赵建社. 航空发动机整体构件特种加工新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

XU Jiawen, ZHAO Jianshe. New nontraditional machining techniques of integral components in aircraft engine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.

[3] 康保印, 范植坚, 唐霖. 闭式整体构件涡道电解加工流场设计与分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 151-156.

KANG Baoyin, FAN Zhijian, TANG Lin. Design and analysis of flow field in electrochemical machining of cochlear channel of closed integral structure[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(1): 151-156.

[4] 李清良, 范植坚, 穆倩. 基于 COMSOL 闭式整体构件流道电解加工流场的仿真[J]. 电加工与模具, 2014(1): 28-31.

LI Qingliang, FAN Zhijian, MU Qian. Emulation for flow field in electrochemical machining of closed integral structure based on COMSOL[J]. Electromachining & Mould, 2014(1): 28-31.

[5] 唐霖, 冯鑫, 任磊, 等. 异形螺旋线电解加工关键技术研究[J]. 电加工与模具, 2018(6): 26-30.

TANG Lin, Feng XIN, REN Lei, et al. Study on key technology for electrochemical machining of special-shaped helix[J]. Electromachining & Mould, 2018(6): 26-30.

[6] 杨森. 异型壳体电解加工及其基于 UG 的参数化设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2013.

YANG Sen. Special-shaped shell of electrochemical machining and parametric design based on UG[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2013.

[7] 穆倩. 闭式整体构件内流道电解加工流场分析[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.

MU Qian. Simulation for flow field in electrochemical Machining of closed integral structure[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014.

[8] 程永奇, 张贵成, 孙友松. 基于 UG 的传动机构有限元研究[J]. 机械, 2010, 11(37): 40-43.

CHEN Yongqi, ZHANG Guicheng, SUN Yousong. Research on finite element analysis of transmission mechanism based on UG[J]. Machinery, 2010, 11(37): 40-43.

[9] 李立顺, 雷韵鸿, 李红勋. 基于 UG 的某保障车架装置的有限元分析[J]. 专用汽车, 2009(10): 52-55.

LI Lishun, LEI Yunhong, LI Hongxun. Finite element analysis of handing equipment of some support vehicle based on UG[J]. Special Purpose Vehicle, 2009(10): 52-55.

[10] 唐勇, 张瑞珊. 基于 UG 的叶轮强度和流场有限元分析[J]. 机械制造与自动化, 2009, 38(4): 61-64.

TANG Yong, ZHANG Ruishan. Finite element analysis of impeller structure of turbo-compressor based on UG[J]. Machine Building & Automation, 2009, 38(4): 61-64.

通讯作者: 康保印, 硕士, 助教, 研究方向为特种加工技术, E-mail: 1091686418@qq.com。

(责编 知舟)

(上接第89页)

## 参考文献

[1] 范玉青, 梅中义, 陶剑. 大型飞机数字化制造工程[M]. 北京: 北京航空工业出版社, 2011.

FAN Yuqing, MEI Zhongyi, TAO Jian. Large aircraft digital manufacturing engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.

[2] 单继东, 王昭阳, 陈贺利, 等. 航空发动机智能制造生产线构建技术研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16): 52-56.

SHAN Jidong, WANG Zhaoyang, CHEN Heli, et al. Building technology of intelligent manufacturing production line for aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 52-56.

[3] MUELANERJ E, WANG Z, MARTIN O, et al. Verification of the indoor GPS system, by comparison with calibrated coordinates and by angular reference[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(6): 2323-2331.

[4] 丁力平, 陈文亮, 卢鹤. 面向大型飞机装配的组合式大尺寸测量系统[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 76-80.

DING Liping, CHEN Wenliang, LU Hu. Combined Large-scale measurement system for large aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 76-80.

[5] 丛培源. 数字化测量技术在型架装配中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

CONG Peiyuan. Application of digital measurement technology in assembly of shape frame[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[6] 张森棠, 付龙, 贺芳, 等. 面向航空发动机的数字化生产线探索与实践[J]. 航空制造技术, 2015, 58(22): 73-77.

ZHANG Sentang, FU Long, HE Fang, et al. Exploration and practice for aeroengine digital production line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 73-77.

[7] 牟文平, 隋少春, 李迎光. 飞机结构件智能数控加工关键技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2015, 58(13): 56-59.

MOU Wenping, SUI Shaochun, LI Yingguang. Key technology for intelligent NC machining of aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(13): 56-59.

[8] 侯志霞, 邹方, 王湘念, 等. 关于建设航空智能生产线的思考[J]. 航空制造技术, 2015, 58(8): 50-52.

HOU Zhixia, ZOU Fang, WANG Xiangnian, et al. Reflections on the construction of the aviation intelligence production line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 50-52.

通讯作者: 俞鸿均, 硕士, 工艺师, 主要研究方向为飞行器数字化制造, E-mail: yhj850303@163.com。

(责编 知舟)