

# 飞机部件柔性装配技术应用及工艺设计

## Technical Application and Process Design of Flexible Assembly for Aircraft Component

成都飞机工业(集团)有限责任公司制造工程部

高 红

[摘要] 随着飞机产品种类的不断丰富以及客户需求的变化,传统的“硬性”飞机部件装配方式已越来越不能适应新机多品种、小批量的研制、生产需求。选用适当的柔性装配技术,进行适应性强的装配工艺设计,可以大大减少研制成本、加快研制进度,以适应多品种、多状态飞机的研制。

关键词: 柔性 装配 工艺设计

**[ABSTRACT]** With the development of the variety of aircraft and the change of customer's requirement, the conventional "hard" aircraft assembly techniques cannot suit to the requirement of new aircraft development and manufacture in variety and little batch. The proper flexible assembly technology is applied and adaptable assembly process design is carried out to reduce the aircraft development cost greatly and expedite aircraft development which suit to the development of more variety and multimode of aircraft.

**Keywords:** Flexibility Assembly Process design

长期以来,我国的航空工业按计划经济模式,企业独立生产一种或几种型号的飞机,其品种单一,传统的固定式装配工装、手工作业生产方式能够较好地满足成本控制、效率等方面的需求。

但是随着飞机产品市场化的进展,客户不断增多,如国内空军、海军、民航,外国用户如巴基斯坦,相应地带来飞机产品需求变化大品种多的问题,如单座或双座歼击机、轰炸机、运输机等。同时为寻求最佳资源组合,异地协同设计/联合制造的模式更为广泛地在飞机生产中应用。面对如此纷繁复杂的市场状况和制造模式,传统的装配生产方式很难满足研制成本、效率及质量等方面的要求。

近十余年来,国外飞机装配技术发展迅速,以波音777、A380、F-22、F-35 等为代表的新型军机大量采用了先进的装配制造技术(如柔性定位系统、自动制孔、数字化检测技术等),并集成为自动化柔性装配系统进

行飞机部件的装配,极大提高了飞机装配的效率和质量。

柔性装配技术是适应新机多品种、快速研制的关键核心技术。必须根据产品结构状况以及研制周期、成本控制等要求,在飞机装配全过程的定位、修切、制孔、连接、检测等环节遵从一定的原则,选取相适应的柔性装配技术。

### 1 飞机装配的主要内容

#### 1.1 飞机装配

飞机装配是根据尺寸协调原则,采用装配工艺装备、工具和设备等,按产品设计及工艺技术要求,将大量的飞机零件逐步组合成组件、板件、段件和部件直至整机的过程。

飞机装配主要涉及如下内容:

- ① 装配工艺设计。确定协调方案、装配单元、定位基准、容差分配、工装方案、装配流程、工艺布局等。
- ② 装配条件准备。装配工艺装备/工具/设备制造、辅助物料准备。
- ③ 装配工艺过程。定位固紧、修配、制孔、密封、连接(安装)等。
- ④ 装配检测试验。密封试验、外形检测、交点测量及系统试验等。
- ⑤ 装配信息管理。装配全过程信息处理系统。

#### 1.2 飞机部件装配

##### 1.2.1 部件装配典型流程<sup>[1]</sup>

飞机部件装配涉及大量零件、标准件、成附件等,是构成飞机的主体部分。据统计,飞机部件装配约占整个飞机制造工作量的40%,是飞机生产的关键重要部分。机身部件典型装配流程如图1所示。

##### 1.2.2 部件装配典型工艺过程

部件装配过程,即利用各种装配工艺技术来完成飞机的装配工作。飞机部件典型装配工艺过程如图2所示,虚线及虚框部分视需采用。

从图2可以看出,零件定位、制孔/修配、连接、检

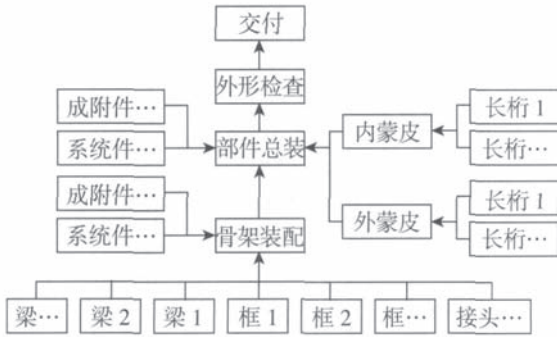


图1 机身部件装配主要流程  
Fig.1 Main workflow of fuselage assembly

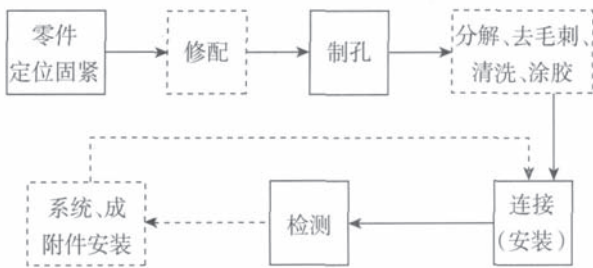


图2 飞机部件典型装配工艺过程  
Fig.2 Typical assembly process for aircraft component

测是飞机部件装配最主要的几个环节。

## 2 飞机部件柔性装配技术的应用

### 2.1 柔性装配工装技术(柔性定位技术)

柔性定位技术按产品对象可归纳为：框、梁类零件柔性定位技术(包括接头类)，蒙皮 / 壁板类零件柔性定位技术，部件类柔性定位技术。

采用柔性定位技术，可以适应一定程度零件结构变化，同时可以大大减少传统刚性定位方式所带来的定位应力。

#### 2.1.1 框、梁类零件柔性定位技术<sup>[2]</sup>

框梁类零件，通常基于其工艺孔或结构交点孔及基准面进行定位。其柔性定位的关键是适合产品结构特点的定位头以及可进行方便调节、数字化调整控制的定位臂(定位机构)，以适应孔位、孔径及基准面的变化。

定位头需依据产品具体结构形式进行适应性设计，图3是一种典型的定位头结构形式，定位单元采用模块化设计，可根据产品定位孔的大小灵活组合和更换。

定位臂(定位机构)可采用如下几种典型的结构设计：

(1) 柔性滑轨定位。

图4为滑轨方式，可以定位在滑轨运动范围内不同位置零件的孔及基准面，采用电机控制运动，可实现定位头平移、伸缩及旋转。

(2) 自适应模块式定位立柱。

重要结构件可采用如图5所示的柔性和自适应模块式定位立柱，以对工艺孔、交点孔进行定位夹紧。采

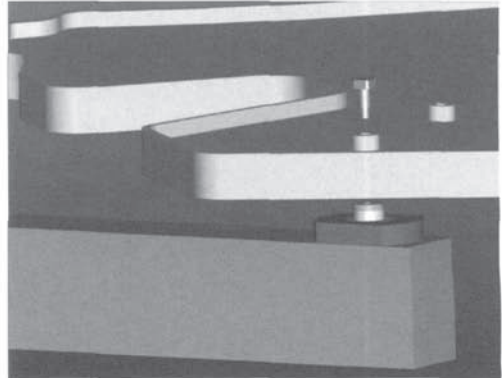


图3 定位模块  
Fig.3 Positioning modular

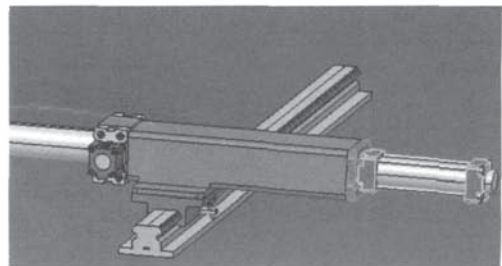


图4 柔性滑轨定位  
Fig.4 Flexible guide way positioning

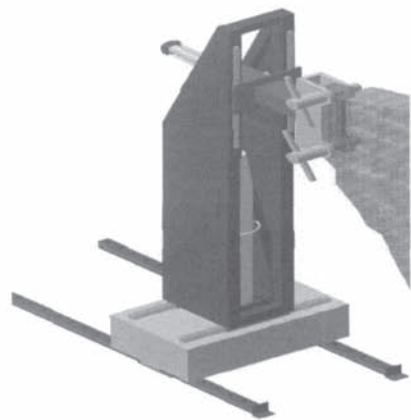


图5 自适应模块式定位立柱  
Fig.5 Self-adaptive modular positioning column

用线性步进电动缸(闭环精度定位可达 0.02mm)对定位头进行控制,可进行三坐标调节。

### ③ 多自由度伺服定位机构。

对于调节坐标要求多的产品对象,可采用多自由度伺服定位机构方式实现对零件的精确定位。市场已有成熟的多自由度伺服定位机构,可结合装配工装安装于适当的位置使用,不过目前其造价较高,如一台五自由度的伺服定位器售价即达 100 万元,而通常一个框的定位都需要 4 组以上的定位机构。

多自由度伺服定位器装有离合器,可以由电机进行主动驱动,也可以由操作人员手动驱动,并能适时锁紧。

无论采用哪种定位机构,均需利用激光雷达、激光跟踪仪等数字化测量设备监控、测量零件安装位置的准确性,并可将测量数据信息反馈给控制系统对定位机构进行位置调整。有遮挡的地方可安装反射镜,通过反射镜可以进行测量。

### 2.1.2 蒙皮/壁板类零件柔性定位技术

对于蒙皮/壁板类零件的柔性定位,仍可选取其基准边或结构孔作为定位基准,此种情况下可采用与框、梁类零件相似的柔性定位方式。

但高性能飞机对外形要求极高,蒙皮/壁板类零件又直接形成飞机外形,所以其内形面与骨架的贴合度、曲面外形定位准确度显得尤为重要,因此更需要直观地将其外形面作为定位基准进行定位。

传统的蒙皮/壁板外形定位通常采用卡板方式进行定位,其定位准确度低,且位置固定不可调,不能适应产品外形变化的定位要求。

随着数字化技术的发展,多点阵成形真空吸盘式柔性定位装置可以很好地实现蒙皮/壁板的外形精确定位,它由一组立柱吸盘组成,其组数根据零件大小、曲率等确定。吸盘可在运动范围内由程序控制三维移动到指定的空间位置,生成与装配件曲面完全符合并均匀分布的吸附点阵,能精确定位和牢固地夹持壁板等装配件。此种定位方式可以适应不同的蒙皮/壁板外形。

将其扩展,此种定位方式还可适用于机翼、组合壁板等装配件的柔性定位,可获得良好的定位准确度。典型结构如图 6 所示。

### 2.1.3 部件类柔性定位技术<sup>[2]</sup>

在部件转换型架进行后续装配、部件对合等情形下,需对飞机部件进行定位。

对飞机部件进行装配定位,通常选取重要结构交点、重要部位外形、测量点等对部件进行姿态控制。例如对机翼进行交点精加工时,主要选取其主结构交点孔

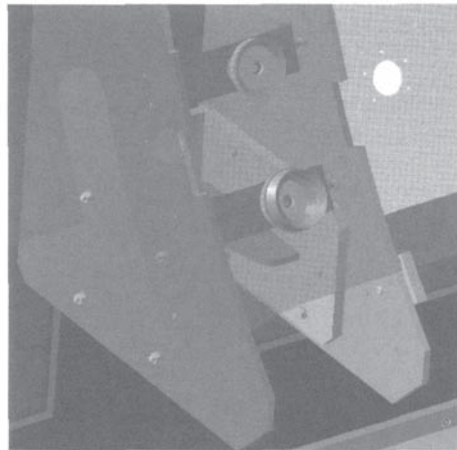


图 6 多点阵成形真空吸盘式柔性定位装置  
Fig.6 Flexible location set with multi lattice shape vacuum brake

及水平测量点作为定位基准进行调整定位,以保证加工后结构交点位置准确度及全机水平测量的要求。传统上均是采用固定型架方式进行定位,仅能满足特定机型的定位加工。

对于飞机部件的定位,仍然可以借用上述框梁类、蒙皮/壁板类零件定位方式进行定位,同时由于其结构的特殊性,可采用 iGPS、激光跟踪仪、激光雷达结合 POGO 柱等方式实现部件的柔性定位。

### 2.2 蒙皮/壁板柔性修切技术<sup>[3]</sup>

蒙皮/壁板修切的主要步骤为蒙皮测量、外形离线复现和修边操作 3 部分。

① 测量。采用激光扫描方式,测量蒙皮/壁板边缘与框、梁的相对位置,确定需修切量及修切位置。

② 外形复现。蒙皮外形的复现采用如图 7 所示的

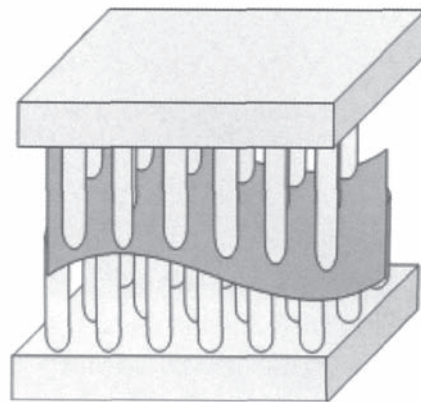


图 7 点阵式柔性坐标夹具  
Fig.7 Lattice flexible coordinate jig

点阵式柔性坐标夹具。

点阵式柔性坐标夹具主要由坐标柱阵列和计算机控制系统组成。在  $x-y$  平面内均匀设置坐标圆柱阵列，每个圆柱阵列可由计算机控制其  $z$  向的高度。计算机根据测量得到的蒙皮外形数据控制点阵圆柱阵列的  $z$  坐标值，使其形成与蒙皮外形一致的点阵轮廓。将蒙皮固定于该夹具内，即可复现蒙皮在框架上的外形。

③ 修边。采用机器人或机床方式均可对固定在柔性坐标夹具内的蒙皮 / 壁板进行修边，根据测量数据，由计算机控制加工头的运动位置、方向。

### 2.3 柔性制孔技术

制孔的关键是孔位、法向的精确控制及制孔精度的保证，传统手工制孔方式质量极不稳定，采用机器人或机床等自动制孔方式可以实现孔位、制孔转速、进给量等的精确控制。自动钻铆在成飞公司部分组件上早已成功应用。制孔机器人可安装在精密导轨上，如此既可保证机器人的精度，也可减少机器人的数量。

柔性自动制孔需考虑的要素包括：

① 孔位控制。采用激光雷达或其他数字化测量装置，可得到需进行制孔的具体位置坐标和法向。

② 制孔进给力平衡。制孔时会对加工头产生反作用力，因此需进行制孔进给力平衡，特别是采用机器人制孔时更需注意考虑平衡方式以免对机器人制孔位置精度产生影响。可在制孔头上增设碾压及吸盘装置从平衡制孔的反作用力。

③ 自动换刀。依照孔位测量数据，由控制系统进行路径规划和刀具的选择，并在三维计算机仿真环境下进行验证，最后由自动化刀具库和机器人 / 机床相配合进行自动换刀，由机器人 / 机床进行精密制孔。

### 2.4 柔性检测技术

柔性检测主要依赖于数字化方式，具体的手段主要有激光雷达、激光跟踪仪、数字照相等，应依照其检测对象以及所需检测的精度进行选取。

对于飞机制造来讲，为满足检测精度，并综合其他因素，较为适用的是采用激光跟踪仪或激光雷达对框、梁、蒙皮 / 壁板等零件的装配位置、装配后外形及交点孔位置进行测量，当只用一个激光跟踪仪或激光雷达时，不可能在一个站点完成所有点的测量，对于挡光位置可通过“转站”或“多台激光跟踪仪或激光雷达”进行测量。

采用激光扫描方式可实现对蒙皮 / 壁板外形等的测量。

### 2.5 柔性装配系统单元集成技术

控制系统将柔性工装系统、制孔 / 修切加工系统、

数字化检测系统等进行集成，用以控制设备各部分完成相关运动，通过相应的控制软件实现各系统或单元协同控制，实现相应装配定位、加工、测量等动作。

系统总体结构如图 8 所示。

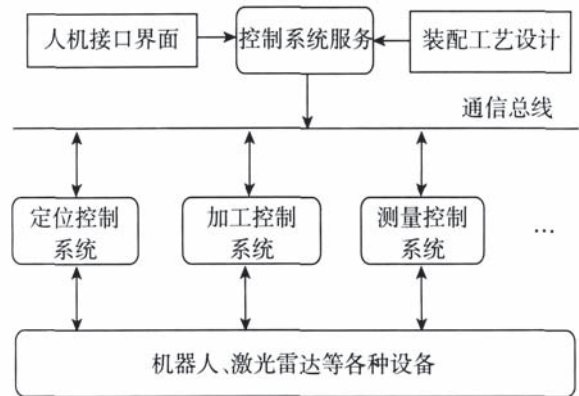


图 8 控制系统总体结构

Fig.8 General structure of control system

## 3 飞机部件柔性装配工艺设计

产品的全三维数字化设计是实现柔性装配的基础，为顺利应用柔性装配技术，需要进行适应性的装配工艺设计。

### 3.1 协调方案设计

为适应柔性装配技术的应用，飞机部件装配必须采用全数字量协调，以实现数字量的全程传递，如此才能通过计算机及控制软件和相应的硬件设备，实现柔性定位、柔性制孔及检测等。

### 3.2 确定装配单元

在确定装配单元，进行工艺分离面划分时，应注意柔性技术应用的可达性，如定位机构、制孔机器人的可达范围等，单个装配单元不宜太过庞大。可以通过虚拟装配仿真软件验证装配单元划分的合理性。

### 3.3 定位基准

定位基准的选取决定了装配误差累积的方向，直接影响产品装配准确度，同时也决定了定位机构、定位头的结构形式。可按照定位对象的类别，按 2.1 节所述方法选取定位基准。

### 3.4 工装设计

在确定需采用的柔性技术后，其相应的设备，如定位机构、制孔机器人、激光雷达等应与工装系统集成，合理布置。工装设计必须采用全三维数字设计，并采用仿

(下转第 87 页)

SetCmdValues(),前者获取建立在以命令驱动的机制下当前各个运动方向上的运动量值,后者则将指定的运动量值传递给机制,并使机构进行相应的运动。通过NC代码文件的数据处理,获取相应运动的运动量值后,便使用SetCmdValues()驱动模型的运动。自动钻铆机运动仿真及其实时显示如图5所示。

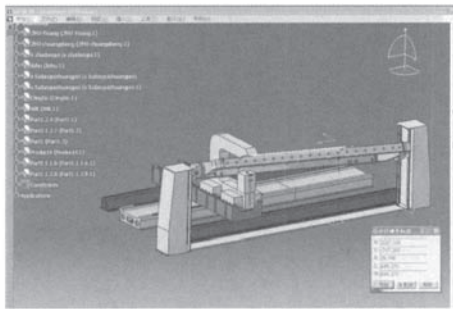


图5 自动钻铆运动过程仿真及实时显示  
Fig.5 Simulation and real-time display of automatic drilling and riveting

#### 3.4.4 干涉检查及其结果的输出

该运动仿真系统的主要功能是进行运动机构的碰撞干涉检查。通过CATIClashFactory创建干涉检查后,在运动机构根据NC代码文件进行每步操作时,使用CATIClash类下的Compute()、GetResult()获取干涉检查的结果(见图6),并通过文本文件和模型高亮显示的方式告知用户。

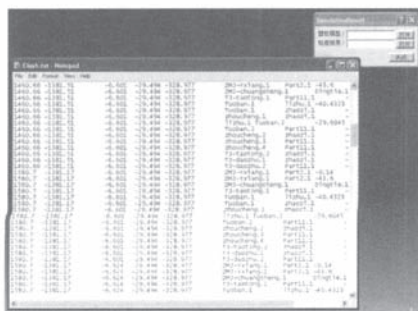


图6 干涉检查结果  
Fig.6 Clash detection result

#### 4 结束语

自动钻铆仿真技术的运用,可以有效地提高自动钻铆设备的应用效率,减少试验次数,节约成本。在基于CATIA V5二次开发的基础上,创建了自动钻铆运动仿真系统,可实现产品的自动装配、运动过程的可视化以及运动过程的干涉碰撞检查,并输出检查结果。该运动

仿真系统并没有对铆接过程进行变形分析,需要在后期针对铆接过程进行变形有限元分析,并通过研究变形产生的规律和理论,寻找有效的补偿方法,完善自动钻铆仿真功能,以更有效地解决生产实践中的问题。

#### 参 考 文 献

[1] Billy Kelly, Colm Costello. FEA modelling of setting and mechanical testing of aluminum blind rivets. Materials Processing Technology, 2004: 153-154, 74-79.  
 [2] 刘斌,刘软娅,韩亚平. CATIA 运动仿真在汽车设计中的应用. 上海汽车, 2006 (7): 38-40.  
 [3] 杨静,郑国磊. 飞机装配仿真中数字人模型及工人姿态的模拟. 机械工程与自动化, 2005, 8 (4): 15-18.  
 [4] 董兴辉,童秉枢,孟祥生. 装配仿真关键技术的研究和实现. 计算机应用, 2000 (20): 198-199.  
 [5] CAA V5 For CATIA Foundations [X]. DASSAULT SYSTEMS, 2001. (责编 淡蓝)

(上接第 83 页)

真软件进行定位、制孔等人机工程的仿真。

#### 3.5 装配仿真

装配流程、装配路径、工艺布局等均需利用仿真软件进行装配过程、人机工程等仿真,以确定各种规划设计的合理性并进行优化。

#### 4 飞机部件柔性装配应用战略

柔性装配技术的应用成本相对较高,在多大程度上采用应重点考虑的因素包括项目变更的可能性、结构形式变更的可能性、产量的大小以及应用部位的复杂程度。

目前国内柔性装配技术的应用还处于起步阶段,在实施战略上应着重从以下几个方面进行。

- ① 逐项突破。单项柔性技术的突破。
- ② 分步推进。在工程应用上分步实施。
- ③ 形成行业标准。减少资源浪费,形成行业。统一标准,有利于产品制造标准化。
- ④ 模块化选用。形成资源库。

#### 参 考 文 献

[1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001.  
 [2] 刘舒红. 数字化技术在装配工装研制中的应用研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2004.  
 [3] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2005 (9): 28-32. (责编 依然)