

# 面向装配的飞机数字化设计技术

## Digital Design Technology for Aircraft Assembly

中航工业北京航空制造工程研究所 王 姮 侯志霞 李光丽  
中航工业第一飞机设计研究院 吴旭辉 王永超

**[摘要]** 本文描述了面向装配的飞机数字化设计理念,为了将装配需求引入到飞机数字化设计中,从不同角度介绍了飞机数字化设计的主要研究内容;并基于MBD技术,分析了装配协调与自动化装配等数字化设计关键技术。对飞机数字化设计具有一定的参考价值。

**关键词:** 数字化 装配 设计

**[ABSTRACT]** The digital design idea for aircraft assembly is described, in order to introducing assembly requirement into the aircraft digital design, from different factors main research content of aircraft digital design is introduced. Based on MBD technology, assembly coordination and automatization assembly which are digital design key technologies are analyzed, which provides a reference for the aircraft digital design.

**Keywords:** Digitization Assembly Design

目前国内飞机产品设计与装配工艺仍沿用传统设计思路,造成后期的飞机装配协调困难,返工率高。虚拟装配技术处于初步实验验证阶段,面向装配的飞机设计研究尚处于起步阶段,工程应用仍属于空白。

国外在波音787和MRJ飞机中全面采用了MBD技术<sup>[1]</sup>。飞机装配中大量使用自动化装配设备,机器人自动制孔设备、柔性定位工装和激光跟踪仪等均为数字驱动,从而实现以全三维的MBD模型为数据来源,提高装配质量,缩短装配周期,改进生产效率。

### 1 面向装配的数字化设计目的和意义

在飞机制造过程中,装配工作量占了整个飞机制造劳动量的40%~50%<sup>[2]</sup>,由于飞机装配工作量大、周期长,飞机制造业正在致力于减小装配难度和工作量、提高装配效率。根据国外飞机研制的成功经验,采用数字化技术、自动化和柔性化装配技术可以大幅度提高飞机的装配质量和效率。飞机产品结构形式对于后期能否适应自动化柔性化装配起到决定性作用,为此,需要在结构设计时,充分考虑柔性装配的需求与特点,设计出适宜于柔性装配的结构形式与连接形式。

### 2 面向装配的数字化设计研究内容

面向装配的设计(DFA, Design for Assembly)是一种针对装配环节的统筹兼顾的设计思想和方法,就是在产品设计过程中利用各种技术手段分析、评价、规划、仿真等,充分考虑产品的装配环节以及与其相关的各种因素的影响,在满足产品性能与功能要求下改进产品的装配结构、使设计的产品是可以装配的,并尽可能降低装配成本和产品成本<sup>[3]</sup>。

#### 2.1 产品装配结构和装配性能分析

在产品设计过程中考虑产品的可装配性,产品结构完成后,在满足产品功能的前提下,对产品的装配结构进行装配性能分析并改进其装配结构。

(1)采用模块化设计。按照模块化设计的要求,将组成产品的各个模块进行仔细设计、分析,使其结构成熟,并采用通用的装配工装夹具,便于自动化装配。

(2)减少零部件数目。在满足产品功能的前提下,权衡产品零部件数量和零部件的结构复杂度对产品装配性能的影响。

(3)减少紧固件数量。紧固件过多将大大增加产品装配的时间和费用,不利于自动化装配和提高装配效率。

(4)设计多功能、多用途零件。采用多功能、多用途零件,可使一个零件完成多个零件的功能,从而简化装配工作量。

(5)结构设计中考虑装配空间的开敞性,适应数字化和自动化、柔性化的定位及装配连接,减少修配工作,便于自动化装配。

(6)减少装配方向等。

#### 2.2 三维模型预装配与虚拟装配设计及仿真

三维模型预装配技术,主要用于进行干涉检查、装配路径仿真及可装配性分析,以零件三维实体造型、产品数据管理和设计共享为基础,协调产品结构,系统设计,检查零部件的装配与拆卸情况,有效地减少因设计错误引起的返工和更改。

虚拟现实技术是对飞机虚拟装配过程、数字人体装

配过程等进行仿真,检验、评价设计飞机的可装配性、可维护性等装配工艺性要求。用来解决飞机由于尺寸、规模、模型数量巨大等带来的虚拟协调困难等问题。进行大部段、全机及重要部位的立体可视化检查,以避免装配返工。

设计时进行大部件对合姿态虚拟装配仿真,验证拆装分解部位的可达性和拆装运动路径的可行性。针对大部件对合调姿要求,在产品数据定义中增加相应测量特征。进行自重情况下结构变形的仿真,不同温度情况下结构变形的仿真,将结果体现在产品数据定义对测量的要求中。

针对采用复合材料壁板一体化设计外形精度不宜保证的特殊情况,结合数字化虚拟装配仿真结果,在产品数模中给出相应的公差定义和设计间隙补偿。针对需要进行数字化精加工的交点,在产品数模中给出各加工点公差的包络定义,有利于制造部门进行数字化仿真和分析。

### 2.3 面向自动化和柔性装配的结构特征设计

自动化和柔性装配需要对产品结构提出一定的需求,如无型架装配过程中采用激光准直定位技术,要求在结构上设计激光定位孔系。开展面向自动化和柔性装配的飞机结构设计时,需要充分考虑以下设计要素:

(1) 结构定位点选取,需要结构设计人员协同工艺人员进行设计和制造基准的定义,尽可能采用基准孔定位方式,少用或不用型面定位。

(2) 分离面划分,在结构设计时考虑柔性工装的使用和柔性装配工艺的实现,分离面的划分应该具有规范性、便捷性、通用性和开敞性要求。

(3) 适宜自动制孔与铆接的结构特征,自动钻铆结构须具有一定的开敞性,保证自动钻铆装置或者钻铆机器人能够自如进出和工作,因此需要合理布置校正基准孔、连接件和预定位孔等,同时,尽量在钻铆路线上使用

同种类型的紧固件以减少钻铆头的更换频率。

(4) 充分考虑零件在制造装配过程中的力学性能变化,以及理论测量基准与实际测量基准之间的变化;不同连接形式对测量基准的特殊要求,以及不同制造工具和装备对产品结构设计的要求等。

### 2.4 装配公差综合与分析

装配公差综合与分析用来在产品的设计阶段和工艺技术准备阶段,预测和控制全部系统的误差。通过公差分配方法来分配目标误差作为次级系统的误差,控制全部系统的目标误差。在各种次级系统中分配误差,以平衡目标误差和其实现难度之间的关系。

计算机辅助装配公差分析与综合建立在产品装配模型的基础上,通过人机交互确定装配公差闭环后,通过约束图求解确定装配公差的组成环,生成尺寸链,并提取尺寸及公差信息。在此基础上,用最优化方法对装配尺寸公差进行分析与综合,使装配公差能合理地分配,以便提高其装配性能,降低装配成本。

## 3 面向装配的数字化设计关键技术

### 3.1 基于模型定义技术(MBD)

以三维产品模型为基础,通过三维标注技术,在三维模型中表达零部件尺寸标注、公差要求、加工制造要求、检验要求等特征信息,取消传统通过二维图纸进行工程定义和表达的方式,直接通过三维模型传递所有零部件制造信息,保证唯一数据源。

全三维研制使得制造信息及检验等信息也承载到三维产品模型中,为进一步解决 CAD 到 CAM 的集成问题(加工、装配、测量、检验等)提供了新的途径,有助于推动工艺装备的跨越式发展。

基于模型定义技术实现机加件、钣金件、复材件、管路系统、电气系统等零件的全三维设计,且贯穿设计、制造和检验全过程。

全三维数字化设计体系的建立全面地推动了数字

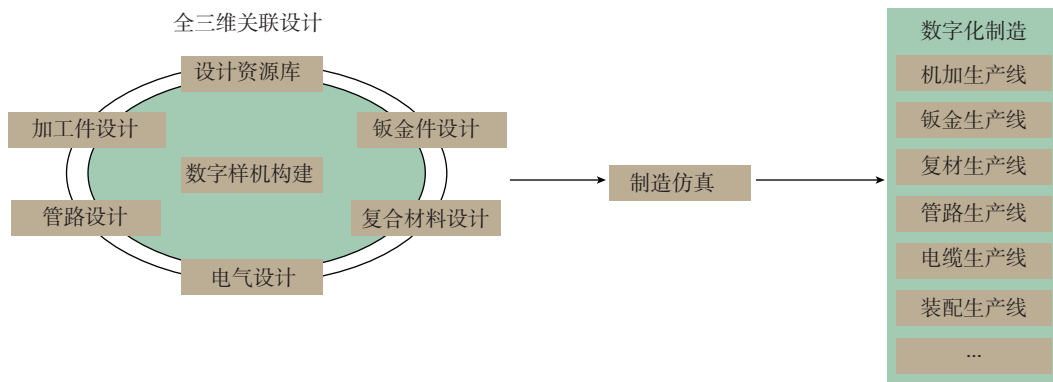


图1 全三维数字化设计体系

Fig.1 Full 3D digital design system

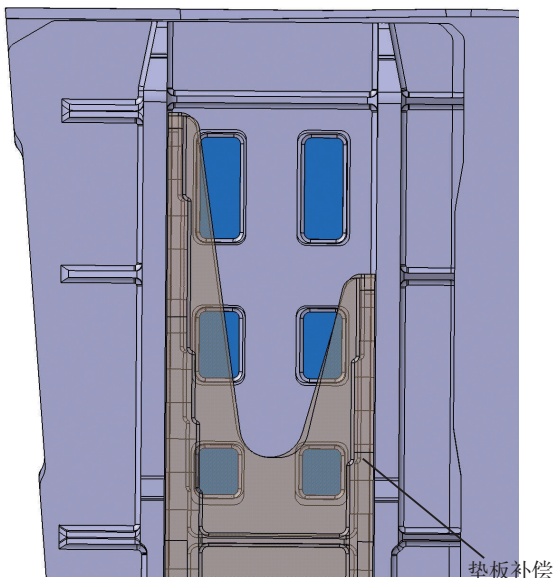


图2 垫板补偿

Fig.2 Plate compensation

化制造和装配体系的发展,构建起了基于全三维研制的设计体系、组织体系、检验体系及工艺装备制造体系,见图1。

### 3.2 装配自定位特征定义

在产品结构上定义定位、连接、测量标定、起吊、支撑、控制等自定位特征。

考虑自定位特征周围区域的强度刚度要求、可操作性及易操作性。对于利用紧固件孔作为定位孔,夹紧位置等自定位特征,由制造部门根据装配要求在产品制造数据集中自行定义。

翼面复合材料零件上增加测量特征、供零件生产后进行测量标定使用。

### 3.3 基于补偿和容差分配要求的模型定义

数字化装配协调与容差分配是在设计初期,通过模拟和仿真等技术,完成对飞机协调方案及容差方案的规划,保证装配可行性、装配精度与装配质量。

在规范化的产品三维模型基础上,快速有效地构建支持数字化装配的装配协调基准,以协调基准为基础,规划数字化装配环境下的装配协调路线。

结合装配准确度、装配变形及误差传递过程,分析和优化装配容差,实现装配容差的合理分配。

数字化装配补偿设计是针对不同装配对象的关键特性,分析装配过程的装配间隙和装配变形,提出补偿方案。垫板补偿见图2,容差分配见图3。

### 3.4 基于环境温度变化要求的模型定义

大型壁板由于尺寸长、加工工艺复杂、受温度影响明显,所以在面向装配的设计中,需要考虑装配环境和零件制造环境温度差。

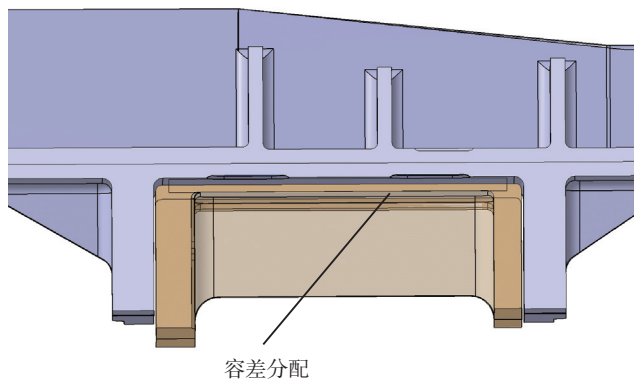


图3 容差分配

Fig.3 Tolerance distribution

考虑温差效应预留设计补偿,保证装配协调,消除装配应力。

### 3.5 满足自动化柔性装配要求的模型定义

飞机产品的零件多为薄壁件,其在装配过程中易产生形态多样的装配变形。因此,为保证飞机装配精度,需要研究合理的柔性装配定位技术,提高装配结构件的定位精度和重复定位精度。壁板分块时,宜采用整体壁板,减少壁板的分块数量,保证在装配过程中实现柔性装配对接。考虑基于机器人施工维护要求的装配通路。

### 3.6 虚拟现实系统集成

通过与虚拟现实系统的集成,实现在虚拟现实环境下的设计协调、干涉检查与分析,人机工效分析,可达性、可操作性、可维修性检查分析及大型飞机虚拟展示等,为进一步的虚拟操纵、力反馈感知、虚拟仿真训练等应用打下基础。

## 4 结束语

目前,国内飞机设计已经逐步引入了面向装配的数字化设计思想。如何实现在设计过程中,自觉考虑装配的需求、进行数字化建模设计是发展数字化柔性装配技术的当务之急<sup>[4]</sup>,本文基于MBD技术,针对装配数字化需求,分析了飞机数字化设计的主要研究内容与关键技术,将飞机装配需求引入到飞机数字化设计中,对飞机的数字化设计具有一定的指导意义

### 参考文献

- [1] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2005(9):28-32
- [2] 李原. 大飞机部件数字化柔性装配若干关键技术. 航空制造技术, 2009(14):48-51.
- [3] 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
- [4] 覃雯. 基于数字化柔性装配的飞机结构设计研究. 航空制造技术, 2011(22):46-48.

(责编 亿霖)