

# 基于数字化柔性装配的飞机结构设计研究

## Study on Aircraft Design Based on Digital Flexible Assembly

中航工业第一飞机设计研究院 章 雯 姚雄华  
西安航空职业技术学院 陈兴虎

**[摘要]** 根据现代飞机数字化柔性装配的技术特点和发展需求,分析了基于柔性装配的飞机结构设计关键技术,提出了在飞机结构设计时需要考虑的要素,如部组件定位点的选取、工艺分离面的划分和装配开敞性要求、适宜自动化装配技术的结构形式及连接形式等。指出了目前存在的问题与解决建议,为飞机数字化柔性装配技术的实现提供参考。

**关键词:** 数字化装配 柔性装配 飞机结构设计

**[ABSTRACT]** In view of the development and new demand of digital flexible assembly, an analysis on the key technology of aircraft design based on digital flexible assembly is made, and some new elements are mentioned such as the selection of locating points of parts and components, the manufactural separation surface, open assembly require, structure forms and connection based on robotization assembly. Some amelioration and problems are considered, which provides a direction for the realization of flexible assembly.

**Keywords:** Digital assembly Flexible assembly Aircraft structure design

在飞机制造过程中,装配工作工作量大、周期长、占用的场地多、工作效率低,占了整个飞机制造劳动量的40%~50%<sup>[1]</sup>,因此,减小装配难度和工作量、缩短装配时间、提高装配质量是飞机制造行业正在致力解决的问题。国内航空业仍采用手工装配、半机械化与机械化装配相结合的传统装配方式,使用大量较复杂的专用型架定位和夹紧的非精益化装配方法,技术陈旧、落后,与西方航空大国差距明显。由于飞机客户的需求在不断变化,现代飞机正在进入构型多、批量少、更新换代快的时代,因此,传统的装配模式与方法已不能满足要求,迫切需要引进一种灵活通用、快速适应、自动化程度高和成本低廉的飞机装配新模式。

20世纪90年代以后,随着航空产品数字化定义与虚拟设计技术的发展,国外先进航空企业提出了飞机柔性装配技术这一概念,目前国外的许多飞机制造业已经开始在现代飞机上应用这一技术,并且发展了数字化柔性装配,使装配工装适应范围广,装配过程简化,所需劳

动力减少,并且大大提高了装配精度和装配质量。由于种种原因,国内数字化柔性装配的关键技术尚未突破,我国对该技术的应用尚在探索阶段,需要解决的问题很多。

数字化柔性装配技术实现的途径是将传统装配模式下的模拟量传递模式转变为数字量传递模式,而数字量传递的基础是飞机数字化设计模型。近几年来,我国飞机数字化设计技术有了很大的发展,接近或达到国际先进水平,但数字化柔性装配技术差距较大,造成这种不匹配局面的主要原因之一是:设计部门与制造企业体制分割,数字化产品设计与制造脱节,基于数字化柔性装配的飞机设计研究很少,也缺乏相应的设计规范与标准要求。

飞机柔性装配不完全局限于装配工艺技术、工装设计制造技术、数字化定位与检测技术,还与结构设计密切相关,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。目前,国内有关柔性装配的工艺技术介绍较多,而涉及基于数字化柔性装配的结构设计的文献很少。

### 1 基于数字化柔性装配的飞机结构设计关键技术

产品数字化设计和数字化装配工艺是并行工程的两个重要方面。面向装配的设计是二者结合的产物,是并行工程的必然要求。即在飞机结构设计阶段考虑并解决装配过程中可能存在的问题,以确保零部件快速、高效、低成本地进行装配。基于数字化柔性装配的飞机结构设计关键技术主要包含4个方面:(1)飞机装配结构和装配性能分析;(2)三维数字化模型预装配与装配虚拟仿真;(3)面向柔性装配的结构特征设计;(4)装配公差综合与分析。

#### 1.1 飞机装配结构和装配性能分析

飞机装配结构分析是指在飞机设计过程中就应考虑可装配性,飞机装配性能分析是指完成飞机结构设计之后,在满足其功能的前提下,对结构进行装配性能分析并改进其装配结构,使其符合数字化柔性装配要求。具体可从如下几个方面入手:

(1)采用模块化设计。分析飞机各组成部分的特

征属性,进行模块化分解与设计,以便采用通用的装配工装夹具。

(2)减少零、组件数目。在满足功能和成本适度要求的前提下,尽可能使用整体结构。

(3)减少紧固件数目。紧固件过多将大大增加飞机装配的时间和费用,不利于自动化装配。

(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)减少装配方向。

## 1.2 三维数字化模型预装配与装配虚拟仿真

三维模型数字化预装配技术,主要用于进行干涉检验及可装配性分析,以零件三维造型、产品数据管理以及设计共享为基础,协调飞机结构、系统设计,检查零部件的可装配与拆卸情况,以及结构、机构和系统之间相互干涉情况,有效地减少因设计错误引起的返工和更改。

在飞机设计过程中,借助虚拟环境和三维数字化模型进行飞机部件对合、系统大型机载设备安装仿真,模拟实际装配过程,检查装配施工通路、定位方法的可行性,尽早发现问题。

## 1.3 面向柔性装配的结构特征设计

柔性装配需要某些结构特征的相互位置关系进行空间定位与检测,如无型架装配过程中采用激光准直定位技术,则要求在结构上设计激光定位孔系。因此,应根据柔性装配的要求,在结构设计时就要结合结构其他功能(如强度、刚度等)要求完成特征设计,所确定的特征应有必要的结构刚度,便于用于柔性装配的定位或检测。

## 1.4 装配公差分析与综合

装配公差分析与综合建立在飞机装配模型的基础上,以控制飞机最后装配形位精度为目标,通过人机交互确定装配公差封闭环后,通过约束图求解可确定装配公差的组成环,并生成尺寸链,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,从而降低装配成本。

此外,还可以通过一些方法减少误差积累,增加装配精度:

(1)增加“补偿环”设计。在装配性能分析中考虑到可能产生误差的环节,在每一个环节提出误差补偿方法,尽可能减少误差积累。

(2)在装配中尽可能统一状态控制和测量的方法。由于不同的控制和测量方法引起的误差形式和误差大小不同,设计中应该进行考虑和协调,使公差产生和消除的形式简单而统一。

在飞机大部件对接装配中,对接形式多样,每种对接形式的公差范围各有区别。常见的对接形式有半壳式、对接面式、轴线式等。装配过程中误差产生的原因也多种多样,一般来说分为零件制造公差和安装公差。安装公差常常与工装定位基准的公差有关,后文对测量基准转化问题有详细论述。此外,安装公差也与装配顺序有关。

目前进行误差分析的较为常用的软件是3DCS。该软件可以对选定的尺寸和公差进行分析,估算敏感公差产生的部位,给出推荐值,从而对装配中容差分配进行建议和指导。软件分析方法已经在中国商飞进行验证式应用。目前在飞机设计中公差的分配大多依靠设计与工艺之间不断的协调。在设计阶段考虑到上述公差分配因素,形成整套的方法和体系,对提高飞机装配效率将有很大的推动作用。

## 2 基于数字化柔性装配的飞机结构设计要素

### 2.1 结构定位点选取

为了减少工装,同时又保证部件的气动外形,不仅需要工艺进行定位点的设计,更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。并且在结构设计中引入柔性装配对测量点、定位点的特殊要求,能减少制造初期设计人员和工艺人员的反复协调,缩短制造周期,提高生产效率。

(1)蒙皮类薄壁组件的定位点选取。

对于飞机中常见的蒙皮类薄壁组件,在柔性装配中通常通过吸盘将薄壁组件固定。当前飞机的蒙皮还是以铝合金为主,因飞机的减重要求,蒙皮类零件在满足强度、刚度和疲劳性能的条件下应该尽可能轻而薄,这样就加大了装配时的难度<sup>[2]</sup>。如何合理选取定位点是其中的关键问题。

原则上讲,由3个不在同一直线上具有矢量的空间点就可定位曲面,但飞机薄壁组件中钣金件较多,其刚性较差,对于飞机装配的曲面常采用多点定位。定位曲面的点越多,在装配时曲面越精确,但同时控制定位点的工作量也在加大,控制程序复杂,装配空间越小,因此定位点的数目也不宜过多<sup>[2]</sup>。在结构设计时,应考虑采用合理工艺措施,提高装配时的结构刚性。

在飞机结构设计中,应结合结构的受力情况分析所选取的定位点是否能与结构的强度和刚度情况匹配。

(2)框、肋类组件的定位点选取。

飞机中另一种常见的结构件是框、肋类组件,尤其是加强框需要进行独立装配。

在飞机加强框的柔性装配上,框板、缘条和角片的

定位主要依靠定位工艺孔<sup>[3]</sup>。

在设计中,要考虑到不同加强框的要求设置工艺孔的数量和大小,工艺孔的设置不能对结构的强度、刚度和疲劳性能造成较大的影响。

### 2.2 适宜自动制孔与铆接的结构特征

由于飞机结构件尺寸大、形状复杂,连接件数量多。在飞机装配中如果完全依照传统的方式手工钻铆,不仅耗时长、效率低,加工精度和质量也难以保证,降低飞机的疲劳寿命。

在柔性装配技术较为成熟的国家,自动装配制孔技术的应用取得了显著的成效,并研制了不少自动钻孔和自动钻铆系统。

自动钻铆结构须具有一定的敞开性,保证自动钻铆装置或者钻铆机器人能够自如进出和工作。合理布置系统校正基准孔/连接件和预定位孔布置。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。

### 2.3 分离面的划分与结构敞开性要求

飞机的分离面包括设计分离面和工艺分离面。分离面的合理划分对柔性工装的使用和柔性装配工艺的实现非常重要。需要在结构设计时就将这些因素考虑在内,使结构具有很好的柔性装配工艺性。分离面的划分应该具有规范性、便捷性、通用性和敞开性要求<sup>[4]</sup>。

例如机身的设计分离面,应该考虑对接时机身的承重托点与定位销位置的坐标可计算性、定位销定位的快捷性以及螺栓连接的开敞性;钣金件的设计要考虑多块板材连接时工艺孔、定位件的选择;机翼壁板连接时,应该使多块壁板的搭接在一条线上使柔性工艺易于实现<sup>[4]</sup>。

此外,结构设计中要考虑到定位器的位置和激光检测系统的方位,结构不仅要满足装配敞开性要求,还要满足柔性夹具安装敞开性要求,以及柔性装配检测方法的敞开性要求。

### 2.4 面向装配过程的飞机结构设计

传统的装配很少考虑装配过程中外界因素的影响,装配误差和装配应力较大。对于数字化柔性装配技术,装配精度较高,对装配过程中的精度要求也更加严格。面向装配过程的飞机结构设计就显得尤为重要。

为了实现面向装配过程的设计,需要考虑以下几点因素:

(1) 零件在制造、装配过程中的力学性能变化,以及理论测量基准和实际测量基准的转化。

环境温度、紧固件连接、重力因素等都可能致零组件的尺寸、几何外形发生变化。在设计过程中进行零组件变形分析和力学性能变化预估是避免装配误差的

有效手段。

在传统的飞机装配过程中,当设计测量基准与实际测量基准出现偏差时,往往是由工艺人员根据生产中实际情况与设计人员进行协调,对偏差的估算和预测缺乏一套有效和精准的方法。适应数字化柔性装配的飞机结构设计需要探索出进行变形分析和力学性能预估的有效计算方法,将设计测量基准和实际测量基准统一起来,如图1所示。

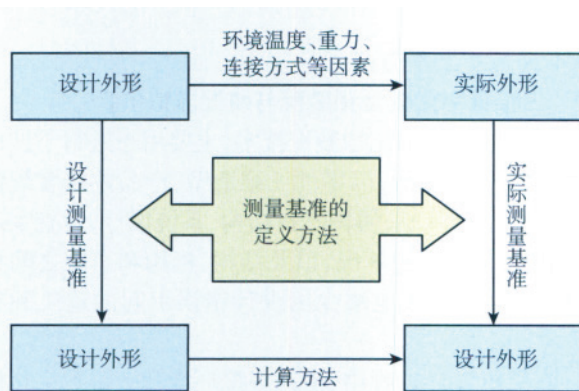


图1 测量基准的定义

Fig.1 Definition of measuring benchmark

(2) 装配中不同的连接形式对测量基准的特殊要求。

装配中常见的对接形式有半硬壳式机身段之间的对接,活动面等铰链对接,以及机翼、机身等大部件之间的对接。不同的连接形式的测量基准选取方法不同。如何保证测量基准的选取具有固定性和可靠性,最大限度地减少制造中的误差积累,是结构设计人员在这部分要考虑的主要问题。

(3) 不同的制造工具和装配设备对零件结构设计的要求。

数字化柔性装配这一新的装配方式的引进必然伴随着新的制造工具和装配工具的出现,结构设计特性应该适应新的工具的要求。

## 3 问题与建议

(1) 目前,国内飞机设计模式和结构特征基本没有考虑数字化柔性装配技术的应用需求,不适应现代飞机制造技术的发展要求。建议大力推进数字化设计与制造一体化,增强结构设计人员对数字化柔性装配知识的学习与了解,在设计过程中,自觉考虑数字化柔性装配的需求。

(2) 从设计单位到制造部门虽已实现数字量传递,但数字化制造方案缺乏系统性。建议国家加大对数字

(下转第52页)

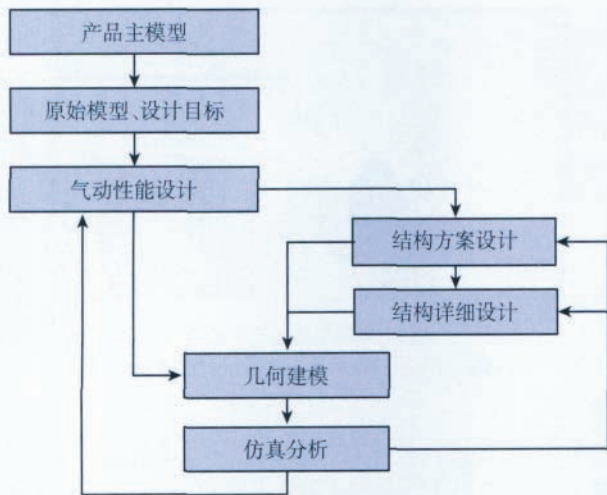


图7 改进的整体叶盘协同设计仿真流程  
Fig.7 Optimized simulation process of cooperated blisk design

流程中改进的要点有:

- (1) 首先从产品主模型获取原始模型及新的设计要求和目标。
- (2) 根据设计要求和目标对原始模型进行气动性能改进设计。
- (3) 将气动性能设计获得的叶型曲面数据交给设计主模型进行几何建模和相应的仿真分析,根据分析反馈结果对气动设计数据进行修改完善。
- (4) 在气动设计结果的基础上进行结构方案设计,并将结构方案设计结果交给设计模型进行几何建模和仿真分析,以仿真分析的反馈结果进行结构方案设计的修改并进行结构详细设计。
- (5) 结构详细设计的结果同样经过设计模型进行建模和分析处理并反馈结果。
- (6) 经过若干次的设计仿真分析迭代最后产生符合设计要求的产品设计模型。
- (7) 通过 WAVE 技术,使得设计与仿真紧密结合,极大缩短了设计周期同时保证设计结果的质量。

#### 4 结论

为研究复杂产品数字样机开发中的关键技术,本文以航空发动机为例,对其数字样机的建模、装配和关联设计方法进行了分析。

- (1) 建立了航空发动机零部件的三维模型,开发了叶片类零件三维建模方法与流程。
- (2) 通过三维的轻量化技术,对上述零组件进行了单元体子装配与整机装配,并对装配模型进行了干涉检查,从而指导三维模型的设计。
- (3) 利用 WAVE 技术对整体叶盘的设计流程进行

了改进,使得设计与仿真紧密结合,从而极大地缩短了设计周期,同时保证设计质量。

#### 参考文献

- [1] 徐磊,陈旭,贺娜. 数字样机开发的关键技术. 重庆理工大学学报(自然科学), 2010, 24 (7): 60-65.
- [2] 南长峰,吴宝海,张定华. 复杂通道类零件五坐标加工全局干涉处理方法. 航空学报, 2010, 10 (31): 2103-2108.
- [3] 武殿梁,羊润党,马登哲. 虚拟装配环境中的装配模型表达技术研究. 计算机集成制造系统 CIMS, 2004, 10 (11): 1364-1369.
- [4] 杨磊,王启富,赵建军. 协同产品开发中的产品模型轻量化技术研究. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [5] 孙拂晓,刘贵军,韦庆梅. UG NX4.0 虚拟装配在产品中的应用. 硅谷, 2010 (24): 140-141.
- [6] 康文利,陈晓明. UG 二次开发技术在虚拟装配干涉检验中的应用. 机械工程与自动化, 2011 (3): 43-45.
- [7] Zhang S S, Zhang D H, Zhou Y. A method of adaptive case modification in fixture rapid design. Proceedings of the 38th International Conference on Computer and Industry Engineering, 2008(3): 2129-2131.
- [8] 肖新华,史明华,杨小凤. 基于模块化和产品实例的变型设计技术研究. 中国机械工程, 2007, 18 (7): 803-806.
- [9] Tanaka F, Kishinami T. EP-based quality diagnosis of shape data of product models for collaborative e-engineering. Computers in Industry, 2006(57): 245-260.

(责编 夏宛)

(上接第 48 页)

化柔性装配技术应用的扶持力度,督促设计与制造部门共同研究数字化制造特点,从而在设计阶段能够实现面向装配设计。双方共同研究、提出面向数字化柔性装配的结构设计要素与结构特征设计要求。规范、提高设计、制造质量和效率。

(3) 国内军民机结构组、部件整体化与模块化程度不高,不利于实现数字化柔性装配。建议统筹提高国内现有制造技术水平,逐步实现飞机的整体化、模块化设计。

(4) 配套建立、大力推行数字化建模、设计和制造工艺标准、规范,是发展数字化柔性装配技术的当务之急。建议结合我国航空工业产业布局的实际情况,加快相关标准的制订宣传与贯彻工作。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 秦政琪,范振伟. 飞机薄壁组件数字化柔性装配研究. 沈阳航空工业学院学报, 2009, 3: 4-7
- [3] 秦政琪,邹爱丽. 飞机框式部件柔性装配型架的研究. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 2: 3-5.
- [4] 秦政琪,武大伟. 基于数字化的飞机柔性装配技术研究. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 3: 21-23.

(责编 小城)