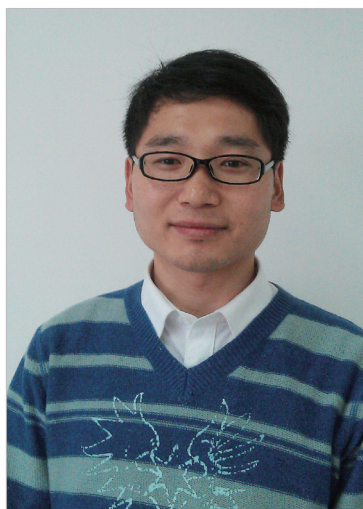


# 飞机装配数字化协调与模拟量协调的对比分析

## Comparison Analysis of Digital Coordination and Modulating Coordination for Aircraft Assembly

中国商飞上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所 唐水龙 卢 鹄



唐水龙

工学博士,研发工程师,毕业于西北工业大学航空宇航制造工程专业,现就职于中国商飞上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所民用飞机先进装配技术中心,研究方向为数字化装配协调与容差分析技术、知识管理等,在研课题主要有“大型客机基于MBD的数字化工艺设计技术研究”等。

零部件装配过程中的互换协调问题是飞机装配的难点,产品的互换协调引起大量返工和产品质量问题,成为影响产品制造周期的主要原因,特别是在新机研制中,这一问题尤为突出。目前,C919大型客机正在如

传统的模拟量协调方法由于其尺寸传递环节多、路线长,产品的制造准确度较低,难以满足新型飞机的高精度要求;而采用先进的数字化装配协调技术在我国航空制造业的应用还不是非常成熟。在大飞机的研制中采用何种协调方法也一直是讨论的热点,本文从多个角度对两种协调方法进行了对比分析,希望对协调方法的选用能够有一定的参考价值。

如火如荼地研制中,产品的装配协调是质量控制的重点,也是技术的难点。特别由于数字化协调技术在我国的应用还不是很成熟,C919客机采用何种协调技术成为了技术部门探讨与研究的热点。本文针对数字化协调与模拟量协调方法,从协调原理、标准工艺装备和准确度保证等角度入手,多方位论述了两者的优势和劣势。但是从飞机研制技术的发展来看,数字化协调是飞机装配的必然趋势,因此论文最后阐述了数字化装配协调技术的基本流程。

### 数字化协调与模拟量协调方法概述

#### 1 模拟量协调

传统的飞机制造是利用模线—

样板—标准样件—生产工装,把飞机的设计要求(各种数据)传递到最后产品上的。基于实物标工的协调方法如图1所示。在这个过程中,标准工艺装备起着至关重要的作用,它是以实体形式体现产品某一部分外形、对接接头和孔系之间相对位置准确度在产品图纸规定的公差范围之内的刚性模拟量。它确定了产品部件、组合件或零件各表面(或外形)、接头、孔系之间的相对正确位置,是制造生产工装的重要依据<sup>[1-4]</sup>。传统的标准工艺装备是以实物形式存在的,在国外称之为“硬标工”<sup>[5-6]</sup>。

#### 2 数字化协调

采用数字标工模型控制产品协调准确度的方法是在各级坐标系中,通过标工中的约束关系将产品协调

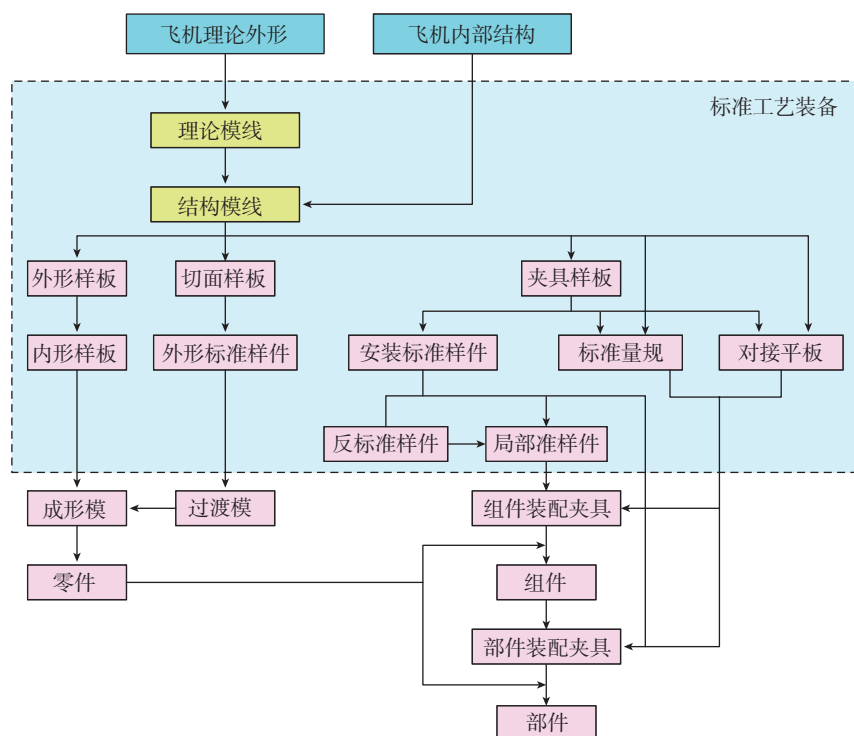


图1 基于模拟量的典型装配协调路线

部位尺寸与形状信息通过数字量方式直接传递到产品或生产工艺装备的过程,保证生产用工艺装备之间、生产工艺装备与产品之间、产品部件和组件之间形状及尺寸的协调互换。基于数字标工的协调原理如图2所示。通过引用工程数据集信息形成数字标工,作为产品制造、协调和检验的依据<sup>[2-4]</sup>。

## 对比分析

数字化协调是数字化技术发展的必然趋势,它是一种先进的质量控制理念,给传统的模拟量协调体系带来了极大的冲击。两种协调方法都具有各自的特点和优势,本节从协调原理、标准工艺装备、产品准确度保证等角度对两者进行对比分析。

### 1 协调原理

模拟量协调体系中,采用实物标工保证产品的协调,其协调的基本原理如下:首先保证标工的设计基准与产品的设计基准一致或从产品的设计基准转换而来,产品装配时,通

的检测一般通过检验夹具/型架完成,检验夹具/型架按照实物标工进行制造、安装与协调,难以获取产品的关键测量点在全机坐标系中的绝对位置信息。

而在数字化装配协调体系中,采用数字标工进行产品的装配协调,它是在保证产品制造符合性的基础上以保证产品的协调性。数字化协调通过数字标工所包含的外形和尺寸约束,确定零组件在机身坐标系中的位置;在装配的过程中,采用激光跟踪仪等数字化测量设备,保证零组件在坐标系中的正确空间位置。

### 2 标准工艺装备

标准工艺装备是产品协调的前提和基础,也是产品制造检验的依据。实物标工是一种刚性模拟量,主要包含以下几大类:模线和样板、标准量规、标准平板、外形标准样件、综合标准样件和零件标准样件。

数字标工是包含并通过统一基准系统(坐标系、主尺寸表面、几何

过实物标工保证产品相对于产品设计基准的位置或外形准确度。产品

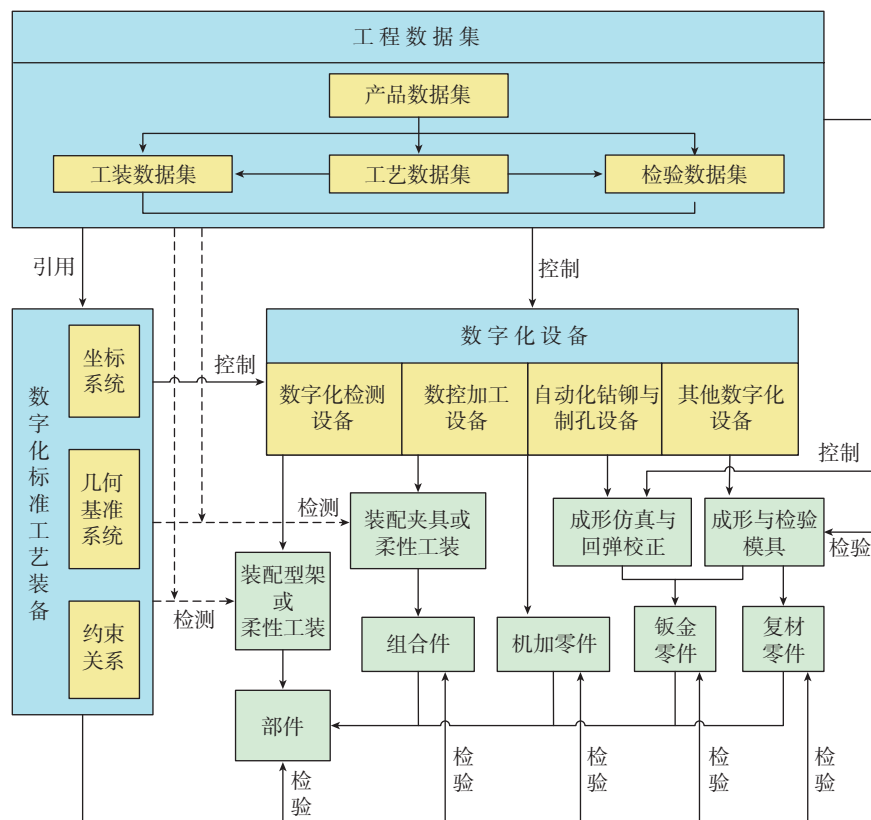


图2 数字化装配典型协调路线

基准)和实体几何(几何形状、尺寸公差)反映飞机产品的协调关系,并以数字量形式存在的三维数字化飞机产品或工艺装备几何定义模型。数字标工的表现形式主要有:以三维数学模型为信息载体的约束集和数字标工定义模型<sup>[7-9]</sup>。

实物标工和数字标工分别是两个协调体系中实现产品装配协调的重要依据,它们在设计制造、管理保存、尺寸稳定性和标工更改等方面都有较大的区别。对于大型飞机,实物标工一般尺寸大、自重大、易变形,需要在专门的场所保存,并且在使用过程中容易磨损而导致精度降低;实物标工修改需进行设计与制造的更改,而标工修改将导致生产工装的大幅修改。数字标工是以产品三维数学模型为核心的尺寸和外形约束集,通过约束数据集控制交点和外形的空间位置,也不需要进行实物的制造,不存在尺寸不稳定性隐患;并且数字标工的修改只需在虚拟的数字化环境中根据要求进行相应的更改,如果大量采用柔性工装,则可避免由标工更改导致的大量工装修改。

### 3 产品准确度的控制

产品的准确度主要体现在协调准确度和制造准确度两个方面,本节从协调准确度控制的基本原则入手,分析数字化装配协调和模拟量装配协调在保证产品的协调准确度和制造准确度中的基本原理,以及提高协调准确度和制造准确度的方法,并将两者所能达到的协调准确度和制造准确度进行对比。

#### 3.1 准确度的基本概念

协调准确度是指相互配合或有相互联系的元素之间的吻合程度。制造准确度是指产品实际尺寸与设计尺寸的一致性程度。协调准确度与制造准确度不是同一个概念,两者的对比如图3所示。协调准确度反映的是一种相对准确度;而制造准确度反映的是产品制造误差,是一种

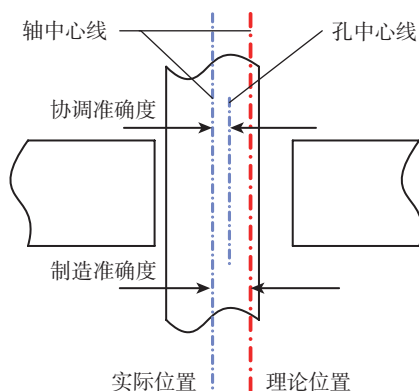


图3 制造准确度与协调准确度

绝对的外形和尺寸的准确度要求。协调准确度高的产品,其制造准确度不一定高;但是,如果能够保证两个零部件具有协调关系制造准确度,则可以保证它们的协调准确度。

#### 3.2 协调控制基本方法

要使两个相互配合零件的同名尺寸相互协调,它们的尺寸传递过程之间就必然存在一定的联系。零件A和B的协调误差 $\Delta_{AB}$ 为<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta_A = \sum_{k=1}^m \Delta_k + \sum_{i=m+1}^{n_1} \Delta_i \\ \Delta_B = \sum_{k=1}^m \Delta_k + \sum_{j=m+1}^{n_2} \Delta_j \\ \Delta_{AB} = L_A - L_B = \Delta_A - \Delta_B \\ = \sum_{i=m+1}^{n_1} \Delta_i - \sum_{j=m+1}^{n_2} \Delta_j \end{cases}, (1)$$

其中, $\Delta_A$ 和 $\Delta_B$ 为零件A与零件B的尺寸误差, $m$ 为协调尺寸 $L_A$ 和 $L_B$ 的共同传递环节, $n_1$ 和 $n_2$ 分别为其独立传递环节。由此可见,零件A和B的协调准确度主要由制造过程中独立的尺寸传递环节决定,独立传递环节越多,传递路线越长,协调准确度越低。

#### 3.3 准确度分析

##### (1) 协调准确度。

在基于模拟量的装配协调体系中,采用关联制造原则保证产品之间的协调准确度。根据上述协调准确度控制的基本原则,提高产品协调准确度的核心是增加具有协调关系产品尺寸的公共传递环节。

在数字化装配协调中,采用独立

制造原则保证产品的制造准确度,从而保证产品之间的协调准确度。因此,要提高产品的协调准确度,就必须缩短产品尺寸的传递路线,降低各个尺寸传递环节的误差,提高产品的制造准确度。

总之,从尺寸的传递与形成角度分析,独立的尺寸传递环节是影响协调准确度主要因素;而相对于模拟量协调方法,数字化装配协调的准确度不一定能有显著的提升。因此,在现阶段大客的研制中,对于协调关系复杂的多孔对接,采用模拟量协调为主,数字化协调为辅的手段比较合适。

##### (2) 制造准确度。

制造准确度反映的是零组件相对于其理论位置/尺寸/外形的误差,数字化装配协调技术减少了许多中间尺寸传递环节,缩短了传递路线,保证产品的制造准确度,进而保证产品的协调准确度。而基于模拟量的装配协调技术通过增加公共传递环节来提高协调准确度,从尺寸传递角度来说,公共环节越多意味着协调尺寸“共同”偏离理论尺寸的程度越大,制造准确度越低。目前通过模拟量协调装配的产品采用数字化手段进行测量检验,其较大的误差恰好反映了产品的制造准确度较低的现状。

#### 3.4 对比分析

根据上述的分析,下面从产品准确度、数字化设备支持、并行工程、工艺装备(协调路线)等角度对数字化装配协调与模拟量装配协调进行全面的对比分析,如表1所示。

### 数字化协调与准确度控制的基本流程

数字化装配协调准确度控制的基本过程如图4所示。在产品的设计阶段,本着DFA的思想,将制造装配过程中的工艺因素采用MBD技术集成到产品的三维数学模型中,作为产品制造、装配的唯一依据。在工艺



表1 模拟量协调与数字化协调的对比分析

比较项目	模拟量装配协调	数字化装配协调
技术成熟度	模拟量装配协调的技术理论体系成熟,技术积累深厚,实施经验丰富,在模拟量协调环境下,各大主机厂都能很好地处理产品的协调问题	数字化装配协调在国内处于起步阶段,技术理论体系不完善,应用实施也不成熟,这是数字化装配协调技术相对于模拟量协调技术最大的劣势
产品准确度	保证产品的协调性,采用关联制造原则,可通过增加尺寸公共传递环节较好地控制产品的协调准确度;但是由于尺寸传递路线长、误差大,产品的制造准确度相对较低	保证产品的符合性,采用独立制造原则,提高协调准确度的根本措施是提高产品的制造准确度,因此相对于模拟量协调,产品制造准确度大大提高,但是协调准确度不一定能有大幅的提升
对数字化设备的信息支持	由于在产品的工艺过程中仍然以基于实物的模拟量信息传递为主,难以获得产品的关键特征在坐标系中的理论位置,对数字化设备的信息支撑不够准确和全面	数字化工艺、数字量信息,能够给数字化设备提供良好的数字信息,有利于打通飞机研制的数字化渠道,充分发挥数字化设备的优势和潜能
并行工程	在工装和产品的生产制造前,必须进行实物标工的研制,是一种典型的串行工作模式	并行工程在数字化装配协调环境中能够较好地实施
标准工艺装备	采用实物标工保证产品、工装的协调,实物标工的研制周期长,费用高,且需要专人专管,需要消耗较大的人力、物力和财力	采用虚拟的约束数据集,即数字标工保证产品、工装的协调,通过 PDM 系统保存即可,简便、安全

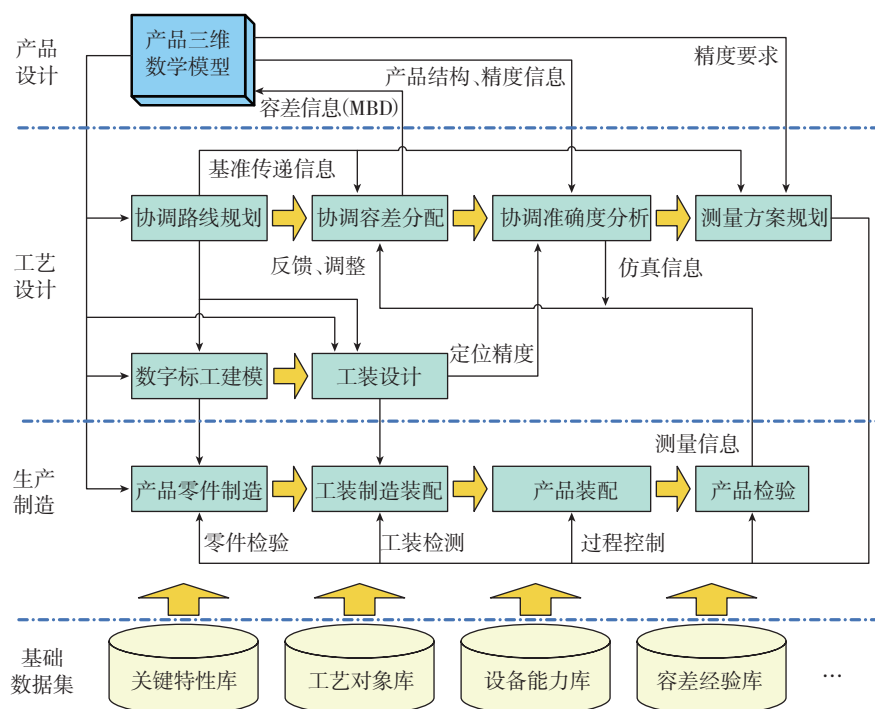


图4 数字化装配协调基本流程

设计阶段,首先建立面向产品协调准确度控制的数字标工模型,作为保证产品、工装协调的唯一依据;同时,根据产品的结构形式和设计精度要求,规划产品的装配协调路线。在协调路线和产品结构的基础上进行协调容差分配和工装设计,同时建立数字化装配误差传递模型,采用蒙特卡

洛虚拟仿真的方法验证容差方案的可行性,根据分析反馈结果修正各个环节的容差。最后根据产品的结构特征、工装的结构特征、产品的关键特性、工装的关键控制点等信息,针对产品的零件制造、工装的制造与装配、产品装配过程控制和产品准确度检验等进行测量方案的规划。在整

个协调准确度的控制过程中,离不开关键特性库、工艺对象库、设备能力库、容差经验库等基础数据集的有效支持。另外,在数字化协调的体系中,应该特别注意产品装配过程各关键工艺要素的监测和控制。

## 结束语

国产大飞机立项研制、新型战斗机试飞,翻开了我国航空史册新的篇章。新型飞机对制造装配精度提出了很高的要求,以保证飞行小时、起降次数、航程和作战能力等关键能力指标。传统的模拟量协调方法由于其尺寸传递环节多、路线长,产品的制造准确度较低,难以满足新型飞机的高精度要求;而采用先进的数字化装配协调技术在我国航空制造业的应用还不是非常成熟。在大飞机的研制中采用何种协调方法也一直是讨论的热点,本文从多个角度对两种协调方法进行了对比分析,希望对协调方法的选用能够有一定的参考价值。

本文共有参考文献9篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 小城)