



民机制造中的数字化尺寸工程及装配偏差评估技术*

Digital Dimensional Engineering and Assembly Variation Evaluation in Civil Aircraft Manufacturing

上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所 郑丞 卢鹤 陈磊
上海交通大学上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室 金隼



郑丞

现为商用飞机有限责任公司下属上海飞机制造有限公司的进站博士后,主要研究方向为产品数字化装配偏差评估与质量控制。

民机产品结构复杂、空间紧凑,零部件数量巨大,另外装配零件具有大尺寸、刚度小、易变形的特点,且零部件之间的装配约束关系和层次关系较多,必须使用复杂的型架来保证装配

数字化尺寸工程及装配偏差评估技术已成为进一步提升飞机装配质量和效率的瓶颈,如何针对大型民机研制与量产需求,有效借鉴国外先进技术,建立面向数字量控制的装配过程尺寸质量控制系统,对实现我国民机装配技术的发展、提升我国民机自主研制能力具有重要意义。

的准确度。产品的最终品质,包括结构强度、空气动力性能、疲劳寿命等在很大程度上都受到装配偏差水平的影响。民机产品的尺寸工程,包含一系列重要的装配偏差控制活动,从尺寸目标规范设计、零部件几何尺寸与公差图纸规范设计到产品的检测与过程控制。它贯穿整个制造生命周期,是主机厂用以协调各级供应商、统筹控制民机产品制造过程的重要手段和技术依据。其中,民机产品的三维装配偏差分析工作,通过数字化偏差仿真建模与计算技术,可以预先评估和优化已有的装配工艺方案,从而达到减小生产风险、节省制造成本、提高生产效率的目的,是民机产品尺寸工程体系中的核心内容^[1]。

一般认为,数字化尺寸工程的概

念最早源于美国汽车制造业于20世纪90年代初开展的“2mm工程”^[2],一种以客观实测数据为依据的质量控制方法,它帮助美国汽车制造业在很短的时间达到了国际先进水平,尺寸工程的理念和方法迅速蔓延到了其他国家及制造行业。在航空领域,波音公司于1992年在波音737机身装配中首次应用数字化尺寸控制手段,采用零件自定位装配技术来减少定位工装^[3]。美国密歇根大学与波音、空客、通用等知名制造企业展开合作,在装配偏差分析、柔性变形控制等领域奠定了坚实的理论与应用基础^[4]。近年来,美国西门子公司将其完整、成熟的数字化质量生命周期管理体系,包括偏差仿真分析、尺寸规划验证及供应商协同管理等关键

* 上海市科学技术委员会科研计划资助项目(12XD1422600),商用飞机有限责任公司科技创新专项研究资助项目(821203-04)资助。

技术,在波音 777、波音 747 等机型中进行了广泛应用^[3]。我国民机装配正处于从工装符合性向独立制造符合性转变的时期,国产自主研发飞机本质上仍主要采用标工的装配协调方法,在保障产品制造符合性上存在局限。当前国内上海飞机制造有限公司和西安飞机国际航空制造股份有限公司针对机身桶段、外翼、平尾等典型部件,在仿真偏差计算和试验验证方面已开展相关研究,但在定位设计、公差分配、测量规划等方面仍然缺乏完善和适合自身的标准规范与流程。由当前国内外现状来看,数字化尺寸工程及装配偏差评估技术已成为进一步提升飞机装配质量和效率的瓶颈,如何针对大型民机研制与量产需求,有效借鉴国外先进技术,建立面向数字量控制的装配过程尺寸质量控制系统,对实现我国民机装配技术的发展、提升我国民机自主研发能力具有重要意义。

波音与某自主机型平尾后梁组件装配工艺对比分析

上飞公司是国内唯一一家进行过大型喷气客机研制、总装生产的飞机制造企业。为了深入开展民机尺寸控制与装配偏差分析技术的研究,前期针对公司转包项目波音平尾后梁组件及公司自主研发的某机型平尾后梁组件,对两者的装配工艺与测量规划等方面进行了对比分析,进而总结当前公司尺寸工程相关工作的特点和需求。

对比分析主要从以下几个方面展开。(1)整理和分析参与平尾装配的零组件及其组成关系,结合工装的站位布置及装配大纲,形成装配路线及相应的装配层级。(2)对各级零组件的设计基准及其在工装上的定位方案进行梳理,确定基准的传递路线;分析每一层级的尺寸控制目标及公差要求,并通过关键特性的拆解,分析相应公差要求的标注方法。

(3)从测量基准、测量工具、测量方式等方面考量平尾组件装配过程中的测量相关工作。

通过上述对波音公司和某自主机型平尾后梁组件装配工艺及测量现状对比和总结(表 1),可以得到以下结论:当前公司在几何尺寸与检测基础规范、基准传递的一致性、公差的设计和分配等方面还存在局限性,需要针对当前民机装配尺寸控制需求,建立面向独立数字量的装配质量评估方法和规范的工作模式,并通过进一步自主创新形成适合自身的装配工艺开发技术能力。

开展民机尺寸工程的基本路线及主要内容

1 民机数字化尺寸工程的概念

民机数字化尺寸工程是一个覆盖机体设计、零件制造和装配全过程的概念,它以满足客户质量需求为目标,以民机装配尺寸精度为核心,从结构、工艺、检测和管理等各个环节进行系统优化,在主机厂和供应商同步开发模式下,提高产品装配质量、缩短新产品开发周期、降低开发成本并保证大批量制造质量的稳定和持续改进。

2 数字化尺寸工程的基本路线及主要内容

民机数字化尺寸工程包含了制定计划、确定目标、制定初步方案、工

艺的评估与优化、标准固化、测量实现、试验验证和持续改进等步骤,开展尺寸工程的基本路线如图 1 所示。以部件装配为例,尺寸工程开展的主要内容如下:

(1) 尺寸项目规划(DMP)。尺寸工程在设计、制造阶段的全局规划,包括组织机构、工作计划进度、资源配置和费用预算等。

(2) 尺寸匹配标准(DTS)。整机的尺寸匹配标准,规定了外形、部件对接、部件内部零组件的准确度公差要求,该标准是尺寸工程活动的最终目标。

(3) 装配工艺方案(APS)。零组件装配工艺方案的初步设计,包括:零组件装配路线、零组件定位及基准传递方案、关键特性及其公差方案等。

(4) 装配偏差分析体系(AVAS)。利用偏差传递的相关理论及软件工具,对已有的装配工艺方案进行评估、诊断和优化,从而降低后期制造风险。

(5) 几何尺寸与公差体系(GD&T)。根据优化后的尺寸工艺方案,形成零组件几何尺寸与公差体系,包括主基准和公差等产品、工艺信息,规定零件的定位和控制测量要求,主要用于设计测点、制作检具、确定产品和标准的符合程度。

(6) 测量系统与测点规划

表1 波音和某自主机型平尾后梁组件装配对比分析

	波音	某自主机型
工艺资料和说明	产品结构包含站位信息、AO 信息、零件和 FO 信息,各资料可链接下载; 工序步序图详细说明执行步骤,包含零件的实际定位方式	产品结构资料中只有架次、工序和 AO 信息,且 AO 的版本比较旧; 没有工序步序图,定位方式仅有粗略说明
定位及基准传递	大部分图纸规定了零件设计基准; 关键零件在设计、装配、检测中基准保持一致	少部分图纸规定了带设计基准的形位公差
关键特性和公差设计	图纸多采用尺寸公差与带基准的形位公差相结合的标注方式,对制造符合性和协调符合性都有较好控制	少部分图纸规定了形位公差,大多数图纸主要通过尺寸公差进行零组件装配质量的保证
零组件测量工艺	从零件到最终组件的每一工艺装配阶段都对测量定位、测量工具和测量方式进行了说明	平尾外伸段组件装配完成之后,目前测量文件不够规范、完善

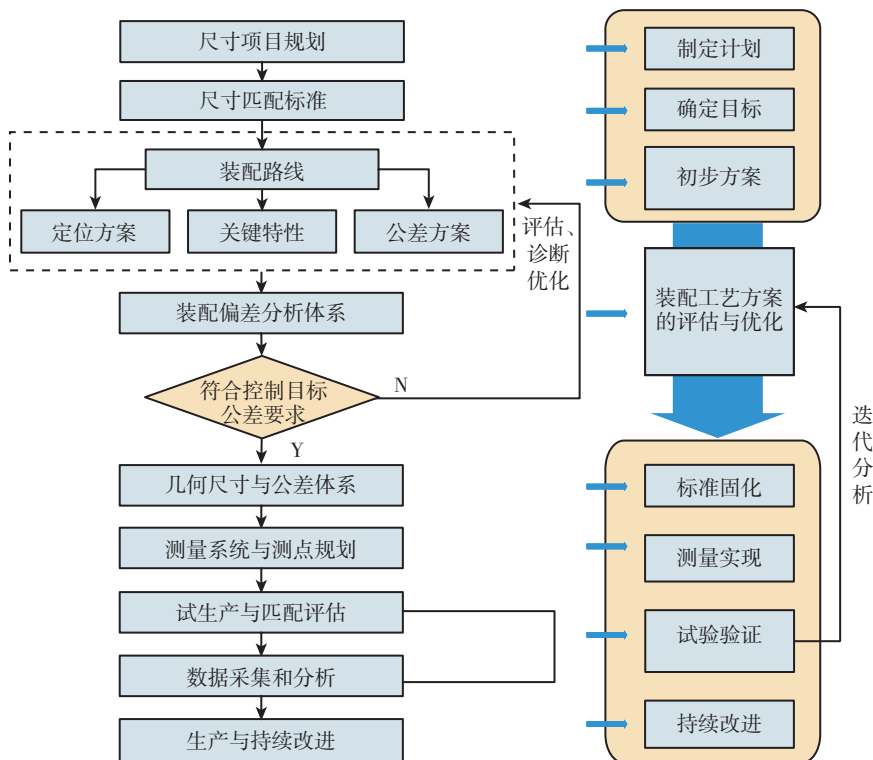


图1 民机数字化尺寸工程基本路线图

(MS&MP)。设计产品的测量点,并选用适合的测量方法和工具,经济、有效地监控产品和工艺要求的尺寸特性,以便产品和工艺得到有效控制。

(7) 试生产与匹配评估(TP&ME)。通过在工装或模拟工装上制造各组件、部件,并进行机身总装,验证实际零件尺寸、工艺过程和设计正确性的重要活动。

(8) 数据采集与分析(DC&A)。包括零件、各大部件、总装过程的数据采集、分析和监控,以及相关系统工具的开发、升级和维护。

(9) 生产与持续改进(P&CI)。在正式生产阶段,通过定期的测量数据抽检与分析,对生产过程进行监控和管理,跟踪试生产过程的尺寸问题,确保质量的持续改进。

基于三维装配偏差 仿真分析的民机装配工艺 评估与优化技术

1 装配偏差分析与尺寸工程的关系
由图2可以看到,装配偏差分析

技术,是在已知相关装配工艺信息(包括零组件及装配路线、零组件定位方案、控制目标及公差要求、关键特性与工装的公差方案等)的条件下,进行装配偏差建模,并计算装配累积偏差的计算机数字化仿真过程。通过数字化偏差分析技术,可以预先评估和优化已有的装配工艺方案,从而达到减小生产风险、节省制造成本、提高生产效率的目的。作为尺寸工程的核心技术,装配偏差分析技术在整个尺寸工程路线中起着承上启下的作用,一方面它对装配工艺初步方案进行评估与校核,另一方面在优化之后将固化几何尺寸与公差方案,为后续的尺寸控制活动提供基础。总的来说,装配偏差分析技术是将设计阶段与制造阶段联系起来的重要纽带。

2 国内外装配偏差分析技术发展现状

国内外许多学者从20世纪90年代初就开始对偏差分析理论进行研究。其中,基于尺寸链的偏差模型是早期的主要分析手段^[5-6],这种模

型直观、简便,适用于零件连接关系比较简单的情況;确定性定位分析方法和偏差传递的状态空间法可以处理尺寸链模型难以解决的空间装配偏差分析问题^[7];除了上述两类偏差分析方法之外,现代控制理论中的状态空间法也被国外学者引入,对装配过程的装配关系和偏差传递方式进行描述,从而揭示装配过程中偏差流传递、变换和耦合关系,实现偏差流描述的数学化和形式化^[8]。

针对尺寸较大且柔性较大的零件装配问题,密歇根大学、通用公司、上海交大等研究单位提出了柔性薄板装配影响系数法、接触有限元模型等,研究敏感矩阵、零件变形和回弹变形之间的关系^[9-10];在计算机辅助公差设计方面,20世纪90年代以来美国DCS、UGS等公司开发出3DCS、VSA等三维公差分析及优化设计软件并在相关领域得到应用。

当前偏差分析理论研究在模型的差异性及关联性、各类装配偏差模型的工程适用性、柔性低应力仿真方法等方面还存在不足,有待于进一步地开发和研究。

3 基本流程和方法

民机部件的三维装配偏差仿真分析工作主要包括:装配工艺方案初步设计、三维装配偏差仿真模型构建、装配评估与优化3部分内容。

(1) 输入:装配工艺方案初步设计。首先,整理和分析参与装配的零组件及组成关系,结合工装的站位布置及装配大纲,形成装配路线,并规划相应的装配层级;其次对各层级零组件的设计基准及其在工装上的定位方案进行分析和比较,形成零组件的初步定位方案,并确定基准的传递路线;最后分析影响各装配层级控制目标的零组件关键特性,并设计初步公差要求,形成装配部件的关键特性树与公差分配树。由以上工作形成装配建模的基本输入条件。

(2) 建模:装配偏差仿真模型构

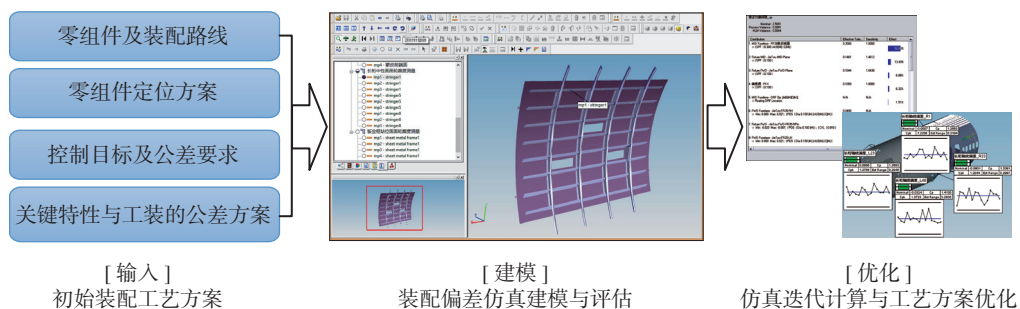


图2 民机数字化装配偏差分析流程

我国民用飞机发展正处在关键时期,支线飞机正处在向批产转换的阶段,而新型号的研制也处于飞机生产阶段。有效借鉴消化国外先进数字化尺寸控制技术,并通过自主创新提升装配工艺自主开发能力,对于提升我国民机产业装配技术水平、少走弯路、提高产品的自主研发能力具有重要意义。

参考文献

- [1] 陈伟,李明慧,周瞳,等.基于数字化装配偏差建模的飞机舱段对接定位方案研究.机械设计与制造,2012(1):245-247.
- [2] 胡仕新.美国汽车车体装配与焊接研究现状.中国机械工程,1997,8(1):24-26.
- [3] 张晓前.飞机制造中的尺寸管理和容差仿真分析技术.航空制造与设计,2012(6):22-24.
- [4] Liu S C, Hu S J. Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(3): 369-374.
- [5] Chase K W, Gao J, Magleby S P. General 2-D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments. Journal of Design and Manufacturing, 1995, 5(4): 263-274.
- [6] Gao J, Chase K W, Magleby S P. General 3-D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments. IIE TRANSACTIONS, 1998, 30(4): 367-377.
- [7] Cai W, Hu S J, Yuan J X. A variational method of robust fixture configuration design for 3-D workpieces. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(5): 593-601.
- [8] Jin J, Shi J. State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(4): 756-762.
- [9] 于奎刚.车身柔性薄板产品装配建模及工艺稳健设计研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [10] 靳思源.飞机壁板件装配偏差的刚柔混合建模方法与应用.机械设计与研究,2013,29(3):58-61.

(责编 深蓝)

建与评估。提取建模输入条件,即零组件及装配路线、零组件定位方案、控制目标及公差要求、关键特性与工装的公差方案等信息,建立三维装配偏差模型并进行计算。通过工艺能力指数分析和偏差影响因素贡献度分析,对初始的装配工艺方案进行评估与校核。

(3) 优化: 仿真迭代计算与工艺优化。分析偏差模型计算结果和影响因素报告,研究不同装配工艺,包括零组件的基准与定位方案、制造偏差水平、装配次序等,对装配偏差的影响机理,通过不断进行仿真迭代计算,在保证装配准确度要求前提下,优化相应的工艺方案。

基于三维装配偏差仿真分析的民机装配工艺评估与优化技术流程如图2所示。

在民机数字化尺寸工程与三维装配偏差分析方面,上飞公司近年来通过与西门子公司、上海交通大学等国内外知名企业与研发单位的充分合作,已经开展了一些基础性研究和试验工作。通过对大型客机各部位的装配偏差仿真分析,在数字化协调与容差分析流程、典型定位与公差库、控制目标仿真测量等方面形成了初步的自主规范和方法,为后续开展更加完善、成熟的民机数字化尺寸工程活动奠定坚实基础。

展望

针对数字化尺寸工程及装配偏差分析技术,需要建立面向独立数字

量的装配质量控制系统和规范的工作模式,目前国内飞机制造业尚无此先例,在已开展的工作中,对于该项技术仍然缺乏实践经验和手段。另一方面,以大型壁板为代表的民机弱刚性部件,尺寸大、零件多、刚性小易变形,质量要求高,在装配偏差分析技术领域仍然存在需要解决的关键难点:

(1) 部件装配过程中的定位夹持变形、连接强迫应力、回弹等因素普遍存在,如何考虑影响装配变形的各项工艺因素,进行柔性装配偏差分析,开发相应的变形控制和补偿技术,对于进一步准确地预测装配偏差,改善应力装配,保障飞机长寿命具有重要的意义。

(2) 批量生产的零件由于加工工艺、习惯的不同,将形成一定的制造偏差规律。如何分析零件加工过程各种因素,结合现场测量数据,总结零件加工中典型特征的偏差分布规律,进而通过研究偏差分布类型对装配质量的影响机理,建立适合当前加工习惯的偏差分布类型,是进一步开展更准确的装配偏差分析的基础。

(3) 零组件的定位方案是影响装配的重要因素,关系到产品的制造准确度以及偏差的诊断效率。如何合理地制定各零组件装配定位方案及其基准传递路线,从而保证最终产品多个控制目标的制造准确度,以及它们相互之间的优化和协调,是主机厂统筹控制民机产品制造过程、协调各级供应商的重要手段和技术依据。