

大型飞机 数字化设计制造技术应用综述

Summarization of Large Commercial Jet Digital Design and Manufacturing
Technology Application

北京航空航天大学飞行器制造工程系 于 勇 陶 剑 范玉青



于 勇

博士, 目前在北京航空航天大学飞行器制造工程系博士后流动站从事科研工作。长期以来与工厂企业和设计院所合作, 并一直追踪国外航空公司, 特别是美国波音和欧洲空客等公司先进的数字化、信息化技术应用, 主要关注产品数据管理、飞机构型管理以及飞机并行产品数字化定义等相关技术的研究。

现代大型客机是先进的喷气技术和计算机技术紧密结合的高技术产物。但当今世界上大型民用运输机市场被欧洲空中客车公司和美国波音公司所主宰, 其他国家(如俄罗

在近年来的大型民用运输机的研制中, 无论是空客 A380 客机, 还是波音 787 客机的研制, 都充分体现了数字化技术是企业的核心竞争力, 是产品创新发展的最有力工具。

斯等) 被逐步地边缘化, 尤其体现在空客 A380 和波音 787 飞机的研发上, 其竞争十分激烈, 充分体现了国家的战略利益和民族的意志。同时, A380 和波音 787 飞机的研发使大型民用运输机的数字化技术又达到了一个新的高度。

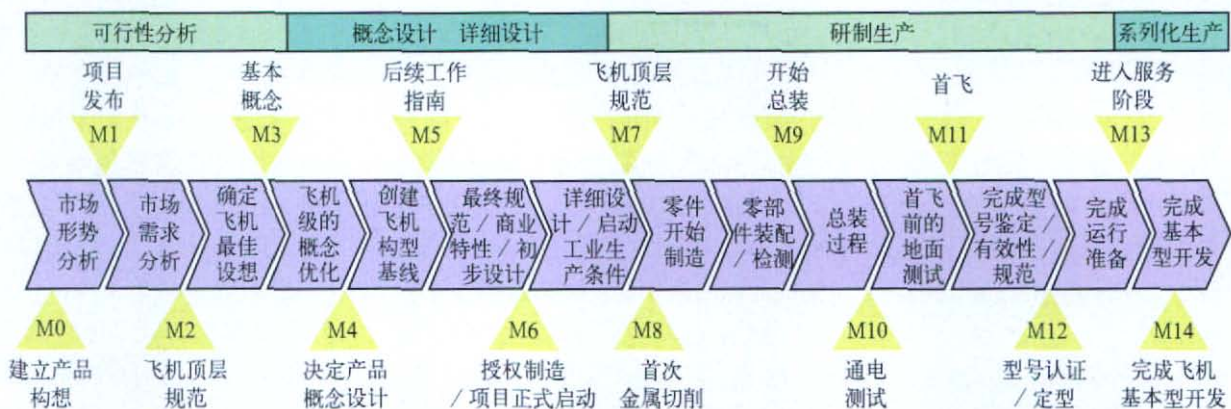
大型民用运输机的发展

在民用航空运输业中, 大型客机占据着绝对的统治地位。大型客机在民航运输中也称作干线运输机, 它一般指客座大于 150、载重 30 ~ 50t 以上、满载航程大于 3000km 的大中型客机, 有时把客座大于 400 的称作超大型客机, 如波音 747 客机和空客公司最新研制的 A380 客机。按航程划分, 现在常把满载航程大于 6000 ~ 10000km 的称为中 / 远程干

线运输机, 航行于国际航线上的多是这类飞机, 一般是具有双通道的宽体客机; 把满载航程在 5000km 以下的称为中 / 近程干线运输机, 航行于国内各大城市之间的多是这类飞机, 常被称为国内干线飞机, 它们一般是双发单通道的窄体客机, 如空客 A320 和波音 737 系列机。还有一种较小的经常飞行在国内局部区域, 从大城市到中小城市飞行, 载客在 120 人以下, 称作支线客机, 如庞巴迪 CRJ 系列机、巴西的 ERJ 系列机、中国的 ARJ 和俄罗斯的 SSJ 客机等, 这类客机也是单通道的支线客机。

大型飞机研制的复杂性

飞机制造业, 特别是大型飞机制造业不同于一般的机械加工工业, 由于其产品复杂度高, 技术难度大, 它



大型民用运输机的研制阶段

是一个国家具有战略性的高技术产业,是现代科技高度集成的产物,它是衡量一个国家科技、工业水平和综合国力的重要标志之一。

大型客机产品极其复杂,具有气动外形要求严格、设计更改频繁、产品构型众多、零件材料和形状各异、内部结构复杂、空间紧凑、各类系统布置密集以及零组件数量巨大等特点。美国的波音

747 大型客机,每架零件数量多达 600 万件,其中连接件为 300 万个,风洞吹风达 15000h,电缆总长 274km。其研制阶段多、周期长。如空客 A380 大型客机,从方案可行性到交付使用,正式进入航线,共用了 19 年时间。大型客机的寿命长,如波音 777

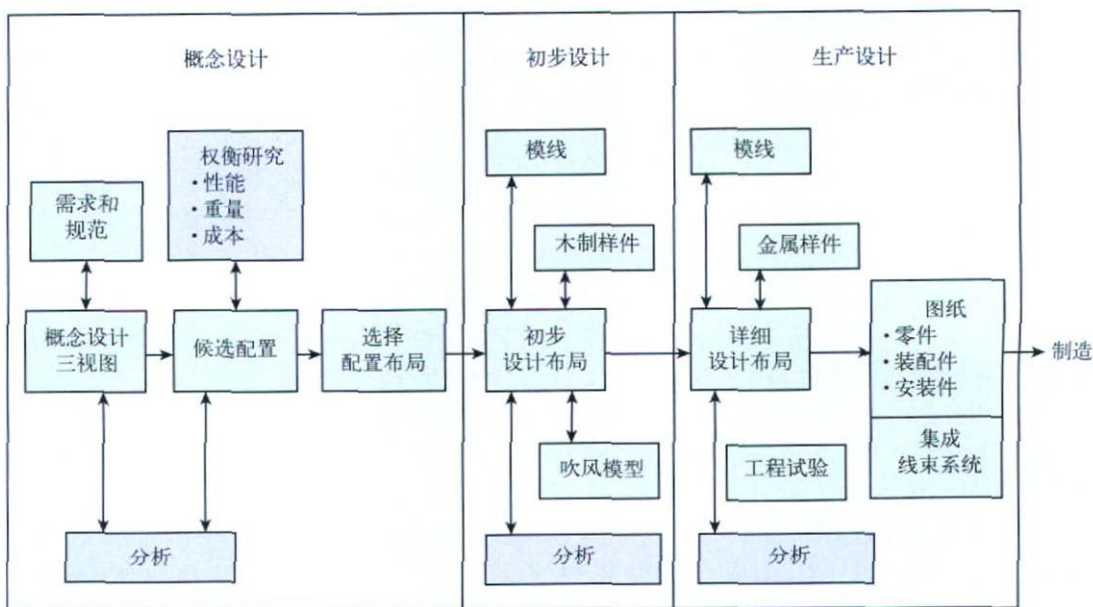
的设计寿命 40 年,以后还继续服务 20 ~ 30 年,总寿命可达 70 年。波音 737 和 747 客机的服务年限都超过了 40 年。一架大型飞机研制,需要全球协同,零部件供应商数千家,如 A380 客机的供应商达 1 万多家,研制过程数据管理困难。更重要的

是保证飞机安全飞行所需的各种设备,如通信、导航、显示和飞行控制等软硬件设备都需采用高新技术。目前还有严格的环境保护要求,如污染排放要少、噪音要低以及燃油利用率要高。所以,从飞机的整个研制过程来看,即从顾客提出对飞机的用户要求开始,直至飞机设计、制造、交付出厂以及投入航线后的服务工作,飞机

了数字化技术是企业的核心竞争力,是产品创新发展的最有力工具。因此,数字化技术的应用,无论在深度和广度上都有了巨大的发展,其特点体现在以下 5 个方面。

1 数字化技术从根本上改变了产品研制方法

现代飞机研制方法,从原有的基于物理(实物)样机的串行方式演



传统的飞机研制过程

的研制过程是一个庞大的系统工程。

数字化设计制造技术应用特点

在近年来的大型民用运输机的研制中,无论是空客 A380 客机,还是波音 787 客机的研制,都充分体现

变成基于数字样机的并行方式。以洛克希德·马丁公司为例,原有的传统研制过程和方法大体分 3 个阶段:概念设计、初步设计和生产设计阶段。在这 3 个设计阶段中,都需绘制模线和制作物理样机来帮助技术人员准确地设计飞机和配置飞机的内

部空间,研制过程是串行的,产品定义信息的传递是不连续的,其缺点众所周知。

在现代新机研制中,虽然其产品的研制阶段没有多大变化,但是,它的模线和物理样机全都由产品的数字化定义或数字样机所替代,而且其研制过程是并行的,便于实现多学科的协同设计。

此外,其协同模式也由原来的基于IPT的集中式协同,发展成为基于网络的分布式协同,即产品设计协同团队IPT不用再集中到一地,而是分布在世界各地,通过网络进行协同设计,交换产品的相关设计信息。波音在设计波音787客机中,就通过全球协同网络环境(GCE),采用了这一最先进的协同方式。

波音公司在研发波音787客机中,不仅协同方式有了重大发展,而且其研制工作的重心也发生了重大转变,波音原来是把飞机产品的各零部件设计信息分发给供应商去制造,波音监管着所有产品的研制进度和质量,最后负责飞机的对接总装和试飞交付,即波音负责着全部飞机的设计工作。但在研制波音787客机中波音做出重大变革,它仅负责飞机的总体设计,把工作量极其繁重的详细设计工作交给了部件的制造单位(波音的合作方)进行,最后波音仅负责十几个大部件的对接总装工作。波音的这种“抓两头”的做法是非常科学的,它不仅大幅度地减轻了波音公司的工作量,更重要的是详细设计是生产性设计,这部分设计由最了解产品如何制造的企业来做是最合适的。波音的这种设计模式也代表了今后飞机产品的设计方向。

2 数字化技术贯穿了整个产品研制过程

数字化协同研制是以业务过程为中心,具有跨地域/多企业的、动态的研制特征。从协同研制全局目标看,产品数字化协同研制中有横向

(多学科协同研制MDO)和纵向(产品全生命周期的协同)2种模式。

在这2种工作模式的基础上,以产品数字化定义的研制过程为对象,将处于孤立和离散状态的参与研制的不同企业/部门/人员/信息整合起来协同工作,并得到完成任务所需的完整的数字化产品信息描述,保证了研制过程中不同阶段、不同部门和不同团队之间工作的并行及信息的连续和有效,充分体现了数字化技术贯穿了整个产品研制全过程,是数字化条件下的飞机结构设计的多学科优化研制模式。首先,必须组建研制所涉及学科的多学科团队(IPT)。所涉及学科必须有自己的、有效的分析模型和设计标准。所有的模型必须参数化。经过数字化的多学科优化后,确定最终的设计变量时,结合几何外形人员所进行的放样和气动外形的风洞仿真试验结果。

空客公司从2004~2007年,组织欧洲多个国家的63家公司参加了VIVACE(Value Improvement through a Virtual Aeronautical Collaborative Enterprise)系统研究项目,共经历了4年时间,构建了多学科协同研制MDO的系统框架,并在3个航空领域——直升机、飞机和发动机,从可行性研究、概念设计直到详细设计的全生命周期里进行了应用性研究。在空客A380的研制过程中,充分利用了多学科协同研制的思想进行飞机的设计。

数字化技术不仅体现在设计过程中,也体现在后续的制造环节中。波音公司在贯彻数字化技术的同时还实行了精益生产。在此过程中,为了便于产品的数据管理和构型控制,把飞机产品分成了几千个模块,在构型控制时,按照有效性使客户飞机产品由不同的模块组成,并相应地对生产流程划分成3个精简作业流程(TBS):TBS1、TBS2(A、B)和TBS3,根据模块性质,不同模块分属

到3个精简作业流程中。这样,完全实现了产品数字化定义的数据能畅通地传递到飞机制造和装配厂的生产下游,并直至飞机的使用和维护。

在波音787客机的研制中,还构建了飞机的物理模型、制造模型、性能模型和维护模型。协同设计团队由早期的DBT(Design Build Team)发展到IPT(Integrated Product Team),以及最新的LCPT(Live Cycle Product Team)。它从另一方面,体现了数字化技术贯穿了整个产品研制过程。

3 数字化定义技术向MBD(全三维)技术发展

由于在通常的CAD系统中,工程技术人员所建立的产品数字化模型仅是三维几何模型,而制造工艺信息还在二维图纸上。

这样仅依据三维几何模型往往难以进行产品的生产和检验。也就是说,三维模型中技术人员不能以简单明了的方式将生产工艺、模具设计与生产、部件装配、部件与产品检验等工序所必须的设计意图添加进来。三维模型虽然包含了二维图纸所不具备的详细几何形状信息,但三维模型中却不包括尺寸和公差的标注、表面粗糙度、表面处理方法、热处理方法、材质、结合方式、间隙的设置、连接范围、润滑油涂刷范围、颜色、要求符合的规格与标准等仅靠几何形状而无法表达的(非几何)信息。另外,在三维建模中,基于形状的注释提示、关键部位的放大图和剖面图等能够更为灵活而合理地传达设计意图的手段也存在不足。这在实际工程中就产生既用三维模型,又离不开二维图纸的矛盾状态。从数据管理看,数据源的二元性,难以保持数据的一致性。基于这些所面临的严重问题,美国机械工程师协会于1997年在波音公司的协助下开始进行有关MBD(Model Based Definition)标准的研究和制定工作,于2003年成

为美国国家标准“Y14.41 DIGITAL PRODUCT DEFINITION DATA PRACTICES”(数字化产品定义数据的实施)。波音公司在本标准基础上,做了进一步研发工作,制定了公司的基于模型定义 MBD 技术应用规范 BDS-600 系列(实际上还有几百项与 MBD 相关的规范),如表 1 所示。

在此过程中其主导思想不能只是简单地将二维图纸的信息反映到三维数据中,而要充分利用三维模型所具备的表现力,去探索便于用户理解且更具效率的设计信息表达方式,其中包括大量的非几何信息,如零件表、设计规范和工艺信息等。这样,才能不再使用百年来的工程师语言——蓝图(二维图纸)。而在贯彻 MBD 思想时,最为艰难的是“要从二维图纸文化这种现有概念中跳出来,从零开始研究新的信息表达方式”。为此,首先应针对概念设计、初步设计、详细设计、生产准备、评估与检验等每个阶段,弄清楚“哪些是产品制造中所必须的信息”。而这些信息都体现在 MBD 技术应用规范 BDS-600 系列中,并且波音在研制波音 787 客机中得到了很好的贯彻,已取得了十分明显的进展,而且也得到国际上的广泛认同。

4 数字化定义技术与其他先进技术相融合

随着计算机技术、数控加工及成形技术、数字化测量技术、复材构



基于模型的人体工程模拟仿真

件成形技术和先进装配技术的不断发展,以及精益生产、并行工程等先进理念的诞生和应用,使现代飞机的协同研制处于不断的变革之中,传统技术不断精化,新材料、新结构、新的加工成形技术不断创新,集成的整体结构、复材构件和数字化技术构筑了新一代飞机先进制造技术的主体框架。数字化技术的采用大幅度地提高了飞机设计制造技术水平,加快了现代飞机研制的整体进程。所有这一切都体现在空客和波音公司的新机研制中,特别是 A380 和波音 787 飞机的研制中,他们使数字化应用技术与其他先进理念和技术相结合,才使数字化应用技术在飞机研制中发挥了巨大的效益。他们认真地研究了怎样使数字化技术与其他先进理念

(精益生产、并行工程)以及先进技术(数控加工及成形技术、数字化测量技术、飞机装配技术和质量保证技术等)相结合,使它们能集成在一起、融合在一起,发挥先进技术的整体效益,这样才能充分发挥数字化技术在飞机研制中的真正作用。

正是数字化定义技术的广泛而深入的应用,大力推动着数字化测量、加工技术及相关数字化技术的发展,反之亦然。如精确的数控切边和钻孔技术、数字化测量技术、激光投影技术、数字化复材铺层技术、数字化装配技术和数字化仿真技术等先进技术得到了快速的发展和應用。

需要特别指出的是,这些数字化设备,是直接利用产品的基于模型数字化定义数据来驱动的,即产品的零部件加工和生产用工装制造,直到飞机的装配设备,都可直接根据基于模型定义 MBD 数据进行,体现了数字化技术与其他先进技术的融合。这

表1 波音BDS-600系列规范

序号	编号	名称
1	BDS-600	基于模型的定义—数据集的一般要求
2	BDS-601	基于模型的定义—数据集和模型的识别
3	BDS-602	基于模型的定义—数据集修订版本
4	BDS-610	基于模型的定义—缩略语、简称和定义
5	BDS-622	基于模型的定义—CATIA V5
6	BDS-624	基于模型的定义—EDS (UG)
7	BDS-640	基于模型的定义—机加零件
8	BDS-641	基于模型的定义—金属板料零件
9	BDS-642	基于模型的定义—铸件和锻件
10	BDS-644	基于模型的定义—夹层复材结构件
11	BDS-647	基于模型的定义—管路弯曲数据集
12	BDS-651	基于模型的定义—零件的另一种表示方法
13	BDS-660	基于模型的定义—装配件
14	BDS-662	基于模型的定义—导线束装配/连接线和电缆装配
15	BDS-680	基于模型的定义—标准零件建模要求

样基本上没有中间的数据传递环节,消除了形状和尺寸的传递误差,即所谓装配过程中实现了“零误差”,保

有性能样机、制造样机和维护样机,便于波音公司与分布在全球的合作者能顺利地进行产品各项功能的协

量检验的下游进行传递、拓延和加工处理的过程。最终形成的飞机产品可以看作是数据的物质表现。基于模型定义 MBD 技术的应用,使 MBD 数据从上游至下游得以无缝传递。从此可知,产品的定义数据能在整个制造过程下游的各个环节有效地利用起来,即用产品定义数据直接来驱动所有的数字化加工和测量设备,直至飞机的装配。也正如洛克希德·马丁公司所指出的那样,数字化主线驱动着 JSF 任务的关键工程和检验技术。真正发挥了数字化技术的优点,这也正好克服了传统飞机制造技术的缺点。



基于模型定义的波音787对接总装仿真

证制造出高质量的飞机产品。

5 数字化技术已经形成完整的应用体系

从飞机的整个研制过程来看,即从顾客对飞机提出要求开始,直至飞机设计、制造、交付出厂以及投入航线后的服务工作,飞机的研制过程是一个全球性的庞大的系统工程。因此,必须有基于能覆盖全球的、完整的数字化网络信息系统,才能研制出现代的大型飞机,无论是波音还是空客公司,都无一例外。

波音公司在全球协同环境 GCE 中使用 DOORS IGE-XAO、CATIA V5、DELMIA V5、ENOVIA 和 Teamcenter 等不同软件作为产品建模和数据管理的工具, ENOVIA (包括 SmartTeam、LCA 和 IPD) 系统作为在不同研发阶段的产品数据管理软件,并用来构建逻辑相关的单一产品数据源 LSSPD (Logical Single Source of Product Data)。LSSPD 使波音 787 飞机不仅具有完整的几何数字样机,而且具

有性能样机、制造样机和维护样机,便于波音公司与分布在全球的合作者能顺利地进行产品各项功能的协

数字化设计制造体系应用框架

用模线样板 - 标准样件方法来协调产品的形状和尺寸是传统飞机制造中尺寸传递的特点。这个方法是基于产品相互联系制造的原则,借助具有特定形状和尺寸的专门实物样件,使飞机设计图纸所描述的形状和尺寸被传递到所制造的零件或产品上。在这个过程中,各个环节所形成的原始尺寸的一些误差,也伴随着形状和尺寸的传递而转移,这些误差的积累(相加或相减),最终体现到产品的最后形状和尺寸上。由于传统方法的形状和尺寸传递环节多,积累误差大,造成飞机装配的困难,极不适应现代飞机产品制造的要求。

现代飞机产品制造过程的实质,是对一个产品进行并行协同的数字化建模、模拟仿真和产品定义,然后对产品的定义数据从设计的上游向零件制造、部件装配、产品总装和测

结束语

飞机制造业是国家的高技术战略产业,尤其体现在高性能战斗机和大型飞机的发展上,它对科技进步具有广泛、持久的牵引作用。特别是数字化技术的迅速发展和广泛应用,使传统的飞机产品的研制过程发生了根本性的变革,大幅度地提高了飞机设计制造技术水平,加快了现代飞机研制的整体进程。

特别在近几年来飞机制造业数字化工程的推动下,各级领导也很重视这一新技术的应用与推广工作,并且在飞机的数字化设计或制造方面,取得了卓有成效的进展,尤其在新机的研制中,这一新技术优势已开始体现出来。但是,并不等于说我们已经很好地掌握了飞机数字化研制的核心技术,充分发挥了数字化新技术在飞机研制中的作用。这可从我国目前数字化技术在新机研制或飞机生产中应用的深度和广度,并行协同的程度、系统集成水平、相应规范的编写、缺乏完整的数字化网络信息系统、产品数据传输不畅、数字化生产线中断以及应用的效果等方面明显地看出。所以,从数字化技术的应用总体来看,我国尚存在很大的差距,还有很长的一段路要走。(责编 金卯)