

# 数字化虚拟制造技术的研究与应用

## Research and Application of Digital Virtual Manufacturing Technology

昌河飞机工业(集团)有限责任公司 吴建香

**[摘要]** 随着计算机软、硬件技术的发展,数字化技术的应用越来越广泛,其领域涉及到医疗、军事、制造等行业。文章论述了数字化虚拟制造技术的概念及国内外发展现状,分析了研究该技术的目的和意义,重点讨论了数字虚拟制造技术在我公司的研究与应用。

关键词: 数字化 虚拟 3D

**[ABSTRACT]** Along with the computer software and hardware technology development, the digitization application is more and more extensive, its field involving medical, military, manufacturing industries. the concept of digital virtual manufacturing technology and the domestic and foreign development present situation are discussed, the purpose and significance of this technology are analyzed, and the digital virtual manufacturing technology in our company's research and application is introduced.

**Keywords:** Digitization Virtualization 3D

数字化虚拟制造指的是全面采用基于数字化三维设计定义的产品,通过信息集成技术、产品数据管理技术;以产品设计的形状特性、精度特性作为依据;在没有实际制造出物理样机以前,对产品的部件进行加工工艺过程定义、装配过程定义、确定部件所属各零组件的装配顺序;而后模拟工厂现有加工条件、装配条件和工段工作安排,进行加工工艺、装配路径的调整和优化;最后在数字化虚拟仿真系统中制造出电子样机。

### 1 国内外研究现状

近年来,国内外对航空产品数字化虚拟制造技术的研究主要集中在装配分析与仿真、装配数据管理、装配工夹具设计制造以及自动化装配等方面。目前,国际上大型复杂产品研制企业都已将数字化装配技术应用于生产中,取得了显著的效益<sup>[1]</sup>。

#### 1.1 国外研究情况

随着电子计算机技术在制造业中的推广应用,出现了以计算机技术为基础、数字化模型为依据、数字量传递为主要手段的数字化设计、制造和检测技术(CAD/CAM/CAT一体化技术)。以波音、空客为首的飞机制造

公司和以西科斯基、欧直为代表的直升机制造公司开始研究数字化设计与制造技术,并在新型号研制中全面采用全数字化的三维设计、模拟仿真、虚拟制造技术,并采用并行工程工作模式,从根本上改变了传统的设计和制造方法,使飞机、汽车等型号研制周期缩短 40%、成本降低 30%、废品率减少 80%、数据错误减少 90%。数字化制造技术已成为航空企业发展的重要手段。

#### 1.2 国内研究情况

我国航空制造业数字化技术起步较晚,在 20 世纪 90 年代中后期进行的老型号改型和对外合作中才开始在部件试制中开始产品数字化定义和数字化协调,并在零件和工装制造中采用数控加工和检测技术。在装配工艺设计方面,开展了一定的研究工作,但从数字化装配协调技术方面来看,目前在我国的航空企业中,从部件铆接装配过程到整机大部件对接以及装配管理基本上还属于手工作业或人工控制,尽管最近几年在局部采用了一些数字化技术,但并没有形成数字化装配体系。

我国航空制造业的飞机制造方法大部分仍然采用基于模拟量传递方式为主的模线—样板—标准工装(模板、样件、量规)工作法,有些环节虽然已实现数字量传递,但仍存在信息孤岛现象,未打通飞机数字化虚拟制造生产线。在装配工艺技术方面,装配协调方案的设计/策划的思想方法和理念仍然是以模拟量传递方式为主的和传统人工手工方式为主的落后模式。在装配制造过程中,仍采用大量的专用标准工装和装配工装,工装的设计、制造、装配虽已经普遍采用一些 CAD/CAM 以及激光跟踪仪等数字化技术方法和手段,但技术尚不配套,应用也不成熟,未能在数字化装配技术方面实现大的突破,导致飞机和直升机制造周期长,装配质量难以提高,效率低、速度慢、成本高、水平低等面貌难以改观。数字化在制造过程中的全面应用成为当前国内飞机制造过程中最薄弱的技术环节<sup>[2]</sup>。

### 2 数字化虚拟制造技术研究的目的和意义

在我国直升机型号试制和生产制造中,尤其是在全机总装、调整、试验过程中,还基本处于手工劳动、人工控制的阶段,数字化技术的应用还比较滞后,应用的程

度还比较低,导致装配周期长、质量差、效率低,影响型号的研制和批生产。国内在此方面的研究深度与数字化技术整体应用的需求不匹配,导致数字化虚拟制造技术体系应用未充分在型号研制中发挥作用。

## 2.1 研究目的

通过直升机数字化建设,补充关键设备和技术,建立包含数字化装配工艺设计系统、装配模拟仿真系统、数字化制造与检测系统的直升机数字化虚拟制造生产线,提高装配效率和质量,实现直升机型号设计、试制、生产全过程的数字化,打通行业数字化工程的瓶颈,大力提高我国直升机型号研制和生产的能力,促进直升机数字化工程整体水平快速提高。

通过产学研相结合的虚拟制造型号研制方式,可以了解和掌握国际先进的特种工艺技术、先进的高效率低成本管理经验;可以促进企业数字化建设,全面提升公司直升机制造及管理水平。

利用仿真软件的人机工程等技术,实现人机工程的数字化预装配仿真模拟,关注工人在装配过程中的方便性,确定装配过程的可操作性和合理性,解决数字化产品模型装配过程中所遇到的干涉问题,以利于提高工作效率和产品装配质量。飞机装配协调在缩短生产周期的同时,使型号研制周期缩短、成本降低、废品率减少、数据错误减少,最终把虚拟制造技术广泛用于直升机产品的整个生产过程中,这将带来可观的经济效益。

## 2.2 研究意义

(1) 数字化虚拟装配是提高直升机型号研制效率、控制成本和保证批生产进度的关键。

充分利用“数字样机”的三维数据,实现在三维基础上的3D工艺规划,将产品设计与工艺规划用同一个数据库集成起来,并对零件的加工过程、产品的装配过程、生产的规划进行3D模拟,真实反映产品从零件到装配、到工位、到流水线、到工厂的生产过程,直观分析产品的可制性、可达性、可拆卸性和可维护性,使得工艺可行性及早反馈到设计,在计算机数字化虚拟环境中随意调整加工工艺。从而提高直升机研制能力、大大缩短型号研制周期、减少产品上市时间。

虚拟制造由于不需要制造出物理样机,而由虚拟技术设计出来的虚拟电子样机代替,产品的反复设计、制造和测试也是在虚拟样机上进行,因此可以减少物理产品的返工和报废。参照虚拟制造进行资源规划配置加工设备,使得企业“硬”设备得到合理利用,大幅度降低技术协调成本、研制成本和制造成本。

通过建模和虚拟制造,建立了全机数字化模型,运用3D制造工艺规划解决方案审核定义流程,验证工作区的性能和互动性,减少了厂际间装配不协调问题的出

现,在产品构思阶段早早提供流程、时间、成本及资源内部的组合和关联的明确信息,实现真正的设计与工艺并行工程,保证了型号的批生产进度。

(2) 数字化虚拟制造生产线建设有利于提高产品质量,提高数字化水平。

直升机有不同于固定翼飞机的结构特点,其机身结构紧凑、装配操作空间狭小;外形复杂,装配协调环节多、精度要求高。特有的旋翼系统、传动系统、操纵系统完全不同于固定翼飞机。在部件装配中,旋翼系统动部件(如主减毂、尾桨毂、自动倾斜器、主桨叶、尾桨叶等)不仅结构复杂,制造精度高,装配后还要进行大量的静、动平衡测试和调整工作;在总装工作中,旋翼系统、传动系统和操纵系统的安装、调整、试验技术要求高,如传动系统主减速器、中减速器、尾减速器的同轴度调整,旋翼系统同轴度调整,操纵系统的主桨和尾桨操纵调整等都直接影响全机的飞行性能、振动水平、操纵性和安全性。

进行数字化虚拟制造,提高动部件试验水平和总装中各系统的调试水平是保证直升机飞行性能和安全的重要手段。工艺人员可以在部署实际材料和机器之前进行虚拟演示,把制造因素提前考虑,利用定义的装配工艺流程信息以及产品和资源信息,定义每个零件的装配路径,实现产品拆装过程的三维动态仿真。在部件对接界面、部分关键连接部位,进行紧固件的预排工作,以减少实际装配中可能出现的边距、间距分配不合理等问题。减少装配干涉问题、装配过程中的反复和人为失误;降低了技术决策风险,提高产品质量。

促使企业尽快完成工装/工具/设备等资源的数字化,并建立相应的3D资源库。促进工艺应用水平的提高,继承、重用优秀的工艺经验,提高设计能力。完全三维的工艺设计,直观、明了,可直接生成3D培训、维护手册,对装配工人和维护人员运用全新的培训模式,方便其准确、快速地理解和掌握;并允许用户以交互方式控制产品,为实现现场可视化装配打好基础。充分整合企业数字化信息资源,实现数字化装配、数字化维护、数字化培训,为实现建立数字化企业的目标创造条件,全面提高数字化水平。

(3) 打通数字化虚拟制造生产线,对我国直升机的发展具有重要意义。

直升机是我国航空工业和国防建设的重要组成部分。目前,我国的直升机研制水平还处于落后阶段。数字化虚拟制造技术是目前航空制造业中的先进生产方式,数字化集成、数字化工艺设计和虚拟制造,装配工艺设计的数字化、规范化,数字样机与数字工装的虚拟装配仿真、产品制造过程的虚拟装配仿真是航空制造业的发展方向。打通数字化虚拟制造生产线,对关键技术进

行突破,所取得的成果和经验可以在今后的型号研制中进行验证和推广,推进我国直升机制造业的发展,对新型号的研制和老型号的改型具有重要的现实意义。数字化技术将愈来愈成为直升机制造过程中不可缺少的先进技术。因此,要使我国直升机研制赶上国际先进水平,必须大力发展直升机数字化虚拟制造技术。

### 3 数字化虚拟制造技术在我公司的应用

昌飞公司作为型号总装单位,在飞机型号的研制过程中,充分运用数字化虚拟制造技术,实现了应用达索公司的三维工艺设计工具 CATIA、DELMIA 软件进行三维外形建模、三维结构设计、结构件的数字化定义和主要飞机系统的电子预装配,首次在中国建立了直升机电子样机。在结构试制中,实现了全机数字化协调和主要机加零件、部分钣金零件的数字化制造;在工装设计制造中,采用了数字化设计、制造技术和激光自动定位安装、测量技术;在组织和管理中,推行了并行工程,实现了设计数据和工艺数据的 PDM 管理<sup>[3]</sup>。

以下是数字化虚拟制造技术的实现过程:

第一阶段:收集创建生产车间、工装、产品数模。

数据的收集与整理是数字化虚拟制造的工作基础。按照某型号机的生产厂房平面布置图建立 1:1 的厂房数模。除公司产品数据管理系统(PDM)中的已有数模外建立并完善某些工装、拖车等电子数据。将所有数模进行分解、转换和整理,按照软件要求将每个需装配部件做成可单独运动的 .Part 或 .Cgr 文件。

第二阶段:工艺规划。

在装配工艺知识库的基础上,将工艺设计过程标准化,在现有 CAPP 软件系统的基础上,对数字样机进行识别、分析,进行工艺过程设计,包括选取工艺分离面、确定装配顺序,调用 CAPP 系统的模板,完成工艺设计,包括装配顺序图表编制、装配指令(AO)编制等,读入数据,并进行管理。

在进行工艺流程规划时,以零件相对装配关系为约束条件,在飞机坐标系下对零件进行重新定位,形成全机虚拟装配模型,实现基于 3D 的工艺流程方案设计和详细工艺设计。

第三阶段:应用 DELMIA 软件进行虚拟装配。

将整理完全的数据导入到 DELMIA 软件数字化工艺规划(DPE)中,打开 DPM 的 Assembly Process Simulation 模块,建立新的 Process,在 ResourcesList 中调入厂房、工装等数模;在 ProductList 中调入产品数模。

如图 1 所示将 1:1 比例的车间、工装及产品等严格按照各车间生产现场进行布置,对试验设备、吊装资源、加载装置、工装以及操作人员的操作空间进行虚拟仿

真、优化,确定装配过程的可操作性和合理性。

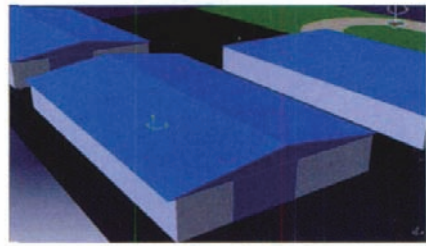


图1 仿真工厂  
Fig.1 Simulation factory

(1)严格按照工人工作方法、产品装配顺序进行装配。在此过程中,使用照相功能改变视角,使我们可以站在工人的角度观看装配,为生成 3D 培训手册做准备;使用移动功能移动工装和产品,实现产品从无到有的安装、定位,观察其是否具有可行性;使用延时功能协调装配时间,可作为计算工人工时的依据;使用关系图调整装配顺序及其串/并联关系。如图 2 所示为装配关系图。

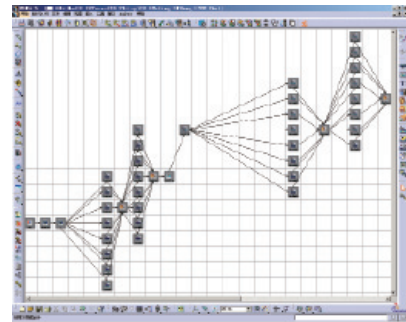


图2 装配关系  
Fig.2 Assembly relation

(2)加入人机工程仿真、优化、验证。在 DPM 中加入精确数字人体模型,可以用来创建、校验和仿真工人的行为。工人可以进行以下操作:走到特定区域,从 1 个姿势变换到另 1 个姿势,使用工具装配、拆卸零件,放置零件到工作区等。

DELMIA Human Task Simulation 2 模块实现了以下在虚拟的 3D 场景中的数字人体模型行为和功能,如图 3 所示:



图3 人机工程  
Fig.3 Man-computer engineering

- 走路(Walk)、抓取(Grasp)、跟随(Follow);
- 爬楼梯(ladder)、跟随设备或预定义路径运动;
- 干涉检查、视线开关;
- 姿态分析可以对人体各种姿态进行分析、仿真和校验,检验各种百分位人体的可达性,装配维修是否方便;
- 工效分析可以对人体从1个工位到另1个工位运动所需要的时间进行自动计算。

### (3) 容差分配决策系统的应用。

在装配技术上,当前影响产品质量和协调问题最为核心的技术就是容差分配技术。根据容差分配要求,需根据设计确定的外缘容差要求和确定的装配顺利等约束条件。在尺寸链层级关系中,从上到下地把上一级的尺寸公差容限一层一层不等量地向下进行分配,从而最大限度地提高产品质量、降低成本、减少工时、减少协调问题。建立容差分配决策系统的具体实施方案为:

- 由飞机数模及协调关系,提取尺寸链关系,建立尺寸链的层级关系并对已知和未知公差进行分类表达;
- 采用计算机方法,初步计算分析容差分配;
- 根据经验数据,采用统计的方法初步确定零件、组建尺寸精度范围;数据对比、抽样,并按尺寸链的传递线路随机模拟分配结果,并进行精度调整。

### (4) DELMIA 三维立体功能的应用。

搭建虚拟环境平台,通过使用各种交互设备,同虚拟环境中的实体相互作用,产生身临其境感觉的交互式视景仿真和信息交流,满足多种设计和工艺方案的评估。将立体方式打开,带上3D眼镜,进行模拟装配检查及时间、成本、产品质量分析。

第四阶段:组合上述的功能能够实现在3D环境之下的数字化虚拟制造全过程,并且循环以上3个阶段对这些过程进行校验,用户可以交互方式控制产品,检查“可视、可达、可维护”的问题直至得到最优数据。最后从PPR数据库打包传递数据,投入生产,实现技术和生产的无缝连接。

## 4 数字化虚拟制造技术的发展展望

目前,我公司数字化虚拟制造技术的研究与应用只涉及了极小的部分。随着计算机软、硬件技术、网络技术和通信技术的发展,使异地协同工作、并行工程实施、型号设计与更改以及构型管理等效率大大提高。数字化虚拟制造技术还可以在我公司得到更广泛的应用:

(1) 新研型号基本上都完成了产品数字化定义,建立了数字样机。老型号可以通过光学三维扫描技术对零件实物进行扫描,进行零件数字化模型的逆向建模。建立并完善公司3D制造资源数据库。

(2) “数字化虚拟制造”在设计周期使用人体工程学分析,以系统的方法支持真正的“面向维护的设计”业务流程。生成3D培训、维护手册对工作人员进行培训,虚拟各种实验设备、实训环境和操作过程,使大多数实训课程可以在虚拟实验室中进行,大多数的技能可以在虚拟实训车间中进行训练,从而不必购置昂贵的实验实训设备。

(3) 根据软件中人机工程的功效分析,可以计算出各个工序所需要的工时,作为公司计划工时的有效依据,提高公司的数字化管理水平。

综上所述,虚拟制造技术的应用对企业提高开发效率、技术创新能力,加强数据采集、分析、处理能力,重用、继承优秀经验起到了重要的作用。可缩小我国飞机行业型号研制能力与国际先进水平的差距,为新型号的研制开发奠定坚实的技术基础;使我公司发展成为全面集成的数字化制造企业。

### 参 考 文 献

- [1] 黄明吉. 虚拟数控技术及应用. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 宋丽萍, 武殿梁, 范秀敏, 等. 面向虚拟装配的复杂产品装配建模技术. 上海交通大学学报, 2007(1):27-30.
- [3] 宁汝新, 郑轶. 虚拟装配技术的研究进展及发展趋势分析. 中国机械工程, 2005, 16(15):1 398-1 404. (责编 侧卫)

(上接第 88 页)

## 4 结束语

由于该仿真平台中各模型参数均是按实物设置,逻辑关系也是遵循真实情况,因此,能准确且形象直观的将某型机的折叠系统仿真演示出来。可以起到以下2方面的作用:(1)通过该平台仿真演示,液压系统的工作运行情况逻辑清楚,形象直观,有利于工程技术人员在此平台上学习掌握该系统,为培训提供有效手段;(2)通过该仿真平台复现故障或者演示可能出现的故障现象,只需要将相应模型的参数设置成“异常值”即可,简单方便,有利于对故障作进一步的分析和研究,提出有效的改进措施。因为很多故障尤其是具有破坏性影响的故障是不可在机上直接复现的,仿真平台很好地解决了这个问题。

可见, Automation Studio 仿真软件将在包括飞机折叠系统等液压相关领域发挥越来越重要的作用。

### 参 考 文 献

- [1] 程安宁. 液压仿真技术的应用与发展. 机床与液压. 2004(5): 9-10. (责编 侧卫)